Ministère
de
l'Equipement,
des Transports
et du Logement

LES CONVOIS DE TRANSPORTS EXCEPTIONNELS

GUIDE

SUR LES CONDITIONS DE PASSAGE DES PORTE-ENGINS-BLINDES LECLERC SUR LES AUTOROUTES ET AUTRES ROUTES FORCE PORTANTE DES OUVRAGES D'ART

D.R.

S.E.T.R.A.

D.S.C.R.

LES CONVOIS DE TRANSPORTS EXCEPTIONNELS

GUIDE

SUR LES CONDITIONS DE PASSAGE DES PORTE-ENGINS-BLINDES LECLERC SUR LES AUTOROUTES ET AUTRES ROUTES FORCE PORTANTE DES OUVRAGES D'ART

Février 1999

Document réalisé et diffusé par le

SERVICE D'ETUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES

Centre des Techniques d'Ouvrages d'Art

46, avenue Aristide Briand - B.P. 100 - F - 92225 Bagneux Cedex - FRANCE

Téléphone : 01 46 11 31 31 - Télécopieur : 01 46 11 31 69

Membres du groupe de travail

Mme H. Oudin-Hograindleur I.T.P.E.

M. J-M. Lacombe I.T.P.E.

M. D. Poineau I.D.T.P.E. - C.A. - Directeur Technique

M. J-Y. Sablon I.T.P.E.

Conseiller (Eurocodes)

M. J-A. Calgaro I.C.P.C.

SOMMAIRE DU GUIDE

- **Avant-propos ;**
- **Caractéristiques du porte-engins-blindés Leclerc ;**
- **Vérification des ouvrages d'art autoroutiers sous le passage des porte-engins-blindés Leclerc ;**
- **Annexe : Résultats des tests effectués ;**
- **Annexe : Vérification des ouvrages d'art des autres routes sous le passage des porte-engins-blindés Leclerc.**

AVANT-PROPOS

La circulaire n°89-52 du 22 Août 1989 [5] a rendu possible la circulation des convois de transports exceptionnels sur les autoroutes. Le Ministère de la Défense, dans le cadre de l'arrêté interministériel du 13 avril 1961 relatif à la circulation des convois et transports militaires routiers, a demandé l'autorisation de faire circuler en convois le porte-engins-blindés Leclerc d'environ 100 tonnes (**appelé P.E.B. dans la suite du document**) à vitesse normale (la vitesse maximale du P.E.B. est de l'ordre de 70 km/h en palier) sur les autoroutes, et notamment sur de longs trajets tels que Mourmelon-Canjuers en empruntant les autoroutes A26, A5, A31, A6, A7 et A8.

Le présent document prévoit la cohabitation des convois de P.E.B. avec les autres véhicules sur autoroute.

Cette cohabitation pose :

- d'une part, des problèmes de sécurité et de gêne aux usagers. Cet aspect est traité dans une convention nationale entre les Ministères des Transports et de la Défense qui fixe les modalités de circulation et d'accompagnement des P.E.B. (document à paraître) ;

- d'autre part, le problème de la force portante des ouvrages d'art qui est traité dans le présent guide.

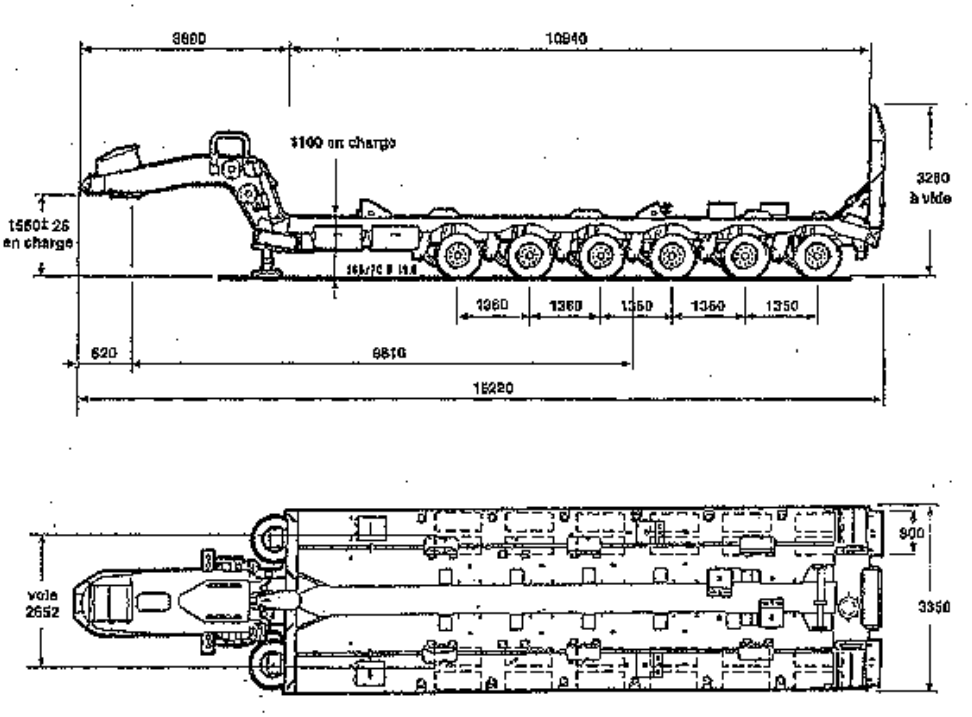
&&&&&&&&&&&&

AVERTISSEMENT

Une annexe au présent guide traite de l'étude de la force portante des ouvrages d'art des autres routes.

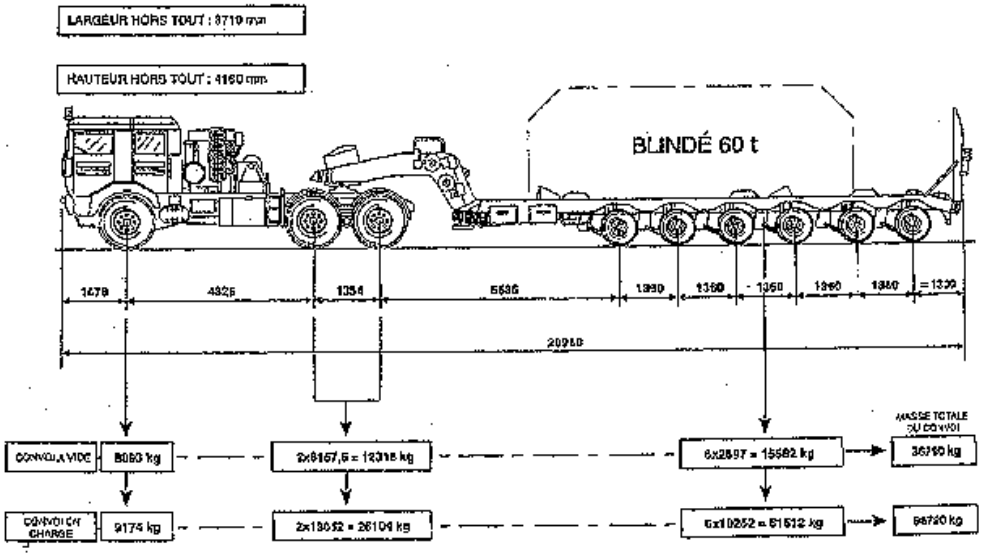
CARACTÉRISTIQUES DU P.E.B. LECLERC

Caractéristiques géométriques de la remorque



voie de la semi-remorque.....2652 mm
largeur de la semi-remorque.....3350mm
distance entre essieux.....1360mm

Caractéristiques du convoi en charge

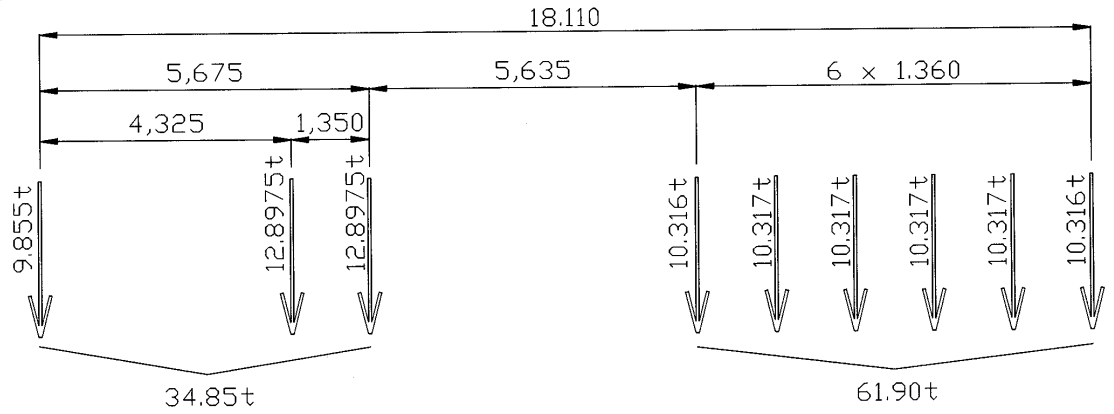


longueur hors tout.....20980 mm
largeur hors tout (rétroviseurs position maxi)..... 3990mm

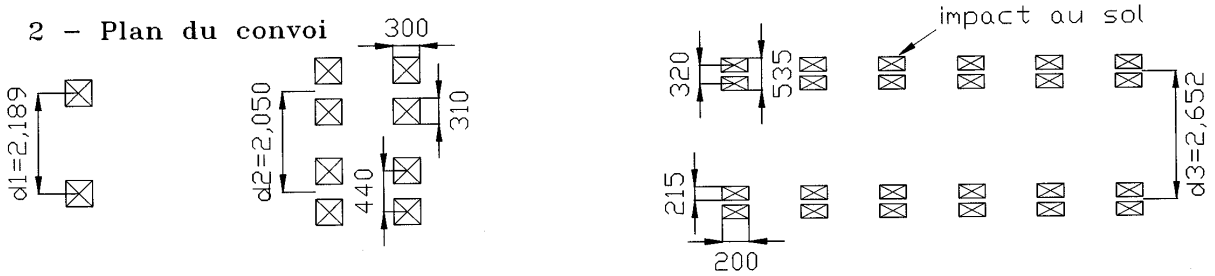
Schéma du P.E.B. LECLERC

P.T.R. ~97 t

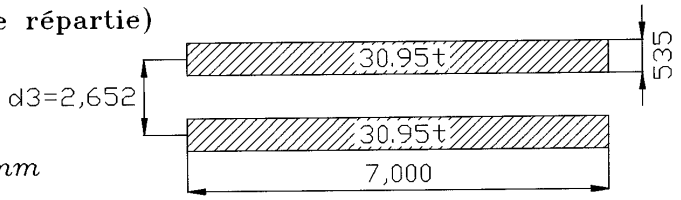
1– Elévation du convoi



2 – Plan du convoi



3 – Plan de la remorque (charge répartie)



Nota : les cotes sont en m et mm

VERIFICATION
DES OUVRAGES D'ART AUTOROUTIERS
SOUS LE PASSAGE
DES PORTE-ENGINS-BLINDES LECLERC

Sommaire

1. INTRODUCTION. 10

1.1. GENERALITES 10
1.2. PRINCIPES A SUIVRE POUR LA VERIFICATION DE LA CHARGE PORTANTE D'UN OUVRAGE. 11
1.2.1. Principes de vérification. 11
1.2.2. "Pièges" à éviter. 11
1.2.3. Tests effectués. 12
1.3. CONDITIONS DE CIRCULATION 13

2. HYPOTHESES DE CALCUL 14

2.1. CHARGES. 14
2.1.1. Porte-engins-blindés Leclerc (P.E.B.). 14
2.1.2. Charges concomitantes. 15
2.1.3. Gradient thermique. 15
2.2. COMBINAISONS A CONSIDERER. 15
2.3. CAS DE CHARGEMENTS 16
2.3.1. Conditions à respecter. 16
2.3.2. Conditions de circulation du P.E.B. prises en compte comme hypothèses de calculs. 16
2.3.3. Les cas de charge à considérer pour le P.E.B. et les charges routières concomitantes. 17

3. MODE D'EMPLOI DU GUIDE 20

3.1. LA DEMARCHE A SUIVRE. 20
3.1.1. La conception 20
3.1.2. L'état de l'ouvrage. 20
3.1.3. Organigramme décisionnel. 20
3.2. L'UTILISATION DES TABLEAUX ET DES INFORMATIONS DU CHAPITRE 4 POUR UN CALCUL. 21
3.2.1. Généralités 21
3.2.2. La sécurité vis à vis d'une accumulation de véhicules. 22
3.2.3. Rappels sur les différents types de coefficients de pondération et de majoration 23
3.2.4. Cas d'un ouvrage "en bon état" dimensionné sans dérogations (ou avec dérogation acceptable) 23
3.2.5. Cas d'un ouvrage dimensionné avec dérogations. 24
3.2.6. L'effort tranchant. 26
3.2.7. Le freinage. 27
3.2.8. Les points à vérifier 27
3.2.9. Exemples de calculs. 27

4. COMBINAISONS D'ACTIONS A PRENDRE EN COMPTE. 29

4.1. HISTORIQUE - TABLEAU CHRONOLOGIQUE TOUS REGLEMENTS CONFONDUS 29
4.2. REGLEMENTS RELATIFS AUX OUVRAGES EN BETON ARME 35
4.2.1. Principales insuffisances de calcul connues. 35
4.2.2. Les dérogations. 35
4.3. REGLEMENTS RELATIFS AUX OUVRAGES EN BETON PRECONTRAINT. 39
4.3.1. Principales insuffisances de calcul connues. 39
4.3.2. Les dérogations. 39
4.4. REGLEMENTS RELATIFS AUX OUVRAGES METALLIQUES ET AUX OUVRAGES MIXTES ACIER/BETON 43
4.4.1. Principales insuffisances de calcul connues. 43
4.4.2. Les dérogations. 43

5. RESULTATS DES TESTS EFFECTUES 47

5.1. SYNTHESE DES RESULTATS DES TESTS 47
5.1.1. Les grands ouvrages. *47*
5.1.2. Les ouvrages types. *47*
5.1.3. La fatigue. *47*
5.2. TESTS EFFECTUES SUR DES GRANDS OUVRAGES 47
5.2.1. Généralités *47*
5.2.2. Profil en travers retenu *47*
5.2.3. Hypothèses de calcul. *47*
5.2.4. Calculs longitudinaux. *48*
5.2.5. Calculs transversaux. *48*
5.2.6. Etude des réactions d'appui *48*
5.3. TESTS EFFECTUES SUR DES OUVRAGES TYPES 49
5.3.1. Généralités *49*
5.3.2. Profil en travers retenu *49*
5.3.3. Description des ouvrages testés. *49*
5.3.4. Hypothèses de calcul. *50*
5.3.5. Spécificités liées à l'utilisation des logiciels de calcul de ponts-types. *51*
5.3.6. Calculs longitudinaux. *52*
5.3.7. Calculs transversaux. *52*
5.4. LES BUSES 52
5.5. LES MURS DE SOUTENEMENT 52
5.6. TESTS SUR LA FATIGUE. 53
5.6.1. Etude de la fatigue en flexion longitudinale pour un ouvrage mixte *53*
5.6.2. Etude de la fatigue en flexion transversale pour un ouvrage mixte. *55*
5.6.3. Conclusion générale de l'étude de la fatigue. *56*

6. REFERENCES 57

---

1. INTRODUCTION.

1.1. Généralités.

La circulaire n°89-52 du 22 Août 1989 [5] a rendu possible la circulation des convois de transports exceptionnels sur les autoroutes. Le Ministère de la Défense, dans le cadre de l'arrêté interministériel du 13 avril 1961 relatif à la circulation des convois et transports militaires routiers, a demandé l'autorisation de faire circuler en convois le porte-engins-blindés Leclerc d'environ 100 tonnes **(appelé P.E.B. dans la suite du document)** à vitesse normale (la vitesse maximale du P.E.B. est de l'ordre de 70 km/h en palier) sur les autoroutes, et notamment sur de longs trajets tels que Mourmelon-Canjuers en empruntant les autoroutes A26, A5, A31, A6, A7 et A8.

Le P.E.B. présente à peu près la même agressivité vis à vis des ouvrages d'art que le convoi C1 de la circulaire du 20 Juillet 1983 [3] (convoi C1 : 94 tonnes dont 64 réparties sur 6,2 mètres et P.E.B. : 97 tonnes dont 61,9 réparties sur 6,8 mètres).

Cette circulaire précise que ce convoi C1 peut circuler sur tous les ponts dimensionnés sous les charges civiles des règlements de charges en vigueur à partir de 1960 si :

- la largeur de la chaussée est d'au moins 6 mètres ;
- l'ouvrage est en bon état ;
- le convoi circule seul, au pas et dans l'axe de l'ouvrage.

Cette circulaire ne précise pas ce qu'il convient de faire dans le cas où l'ouvrage est soumis à un gradient thermique ou lorsqu'il a été dimensionné sous les charges militaires ! La circulaire ne précise pas non plus les cas où le convoi C1 peut circuler à vitesse normale....

Le présent document répond à une demande de Messieurs Nourisson et Trouillet de R/CA, car il n'était pas envisageable, sauf dans certains cas particuliers (ouvrages en mauvais état...), de faire passer chaque de P.E.B. sur les ouvrages des autoroutes concédées, seul, au pas, dans l'axe et en période de gradient nul.

Le présent document envisage donc la cohabitation des convois de P.E.B. avec les autres véhicules sur autoroute. Les principes exposés sont également utilisables pour la vérifications des ouvrages hors autoroutes moyennant quelques adaptations qui font l'objet d'une annexe au présent guide.

Cette cohabitation pose :

- d'une part, des problèmes de sécurité et de gêne aux usagers. Cet aspect est traité par "la convention nationale" entre les Ministères des Transports et de la Défense qui fixe les modalités de circulation et d'accompagnement des P.E.B. ;
- d'autre part, le problème de la force portante des ouvrages d'art qui est traité dans le présent Guide.

Remarque : Il est à noter qu'en principe[1] les ouvrages sous autoroutes doivent avoir été dimensionnés sous les charges militaires [convoi de 4ème classe (char de 100 tonnes) puis, à partir de 1971 sous le convoi M120 de 110 tonnes].
Le P.E.B. considéré seul est a priori moins agressif que le char réglementaire, mais ce char est supposé circuler seul sur autoroute, alors que les convois de P.E.B. sont mêlés au trafic. En outre, les coefficients partiels de sécurité n'ont pas forcément les mêmes valeurs..
Le fait qu'un ouvrage a été dimensionné sous le convoi MC 120 n'est donc pas suffisant pour affirmer que l'ouvrage peut supporter le convoi de P.E.B. mêlé au trafic.

---

[1] Ce n'est pas le cas des ponts des autoroutes A13 et A12 qui ont été dimensionnés sous le convoi de la circulaire de 1920 et de certains ponts des autoroutes A1 et A26..
C'est le cas des ponts de l'autoroute Estérel Côte d'Azur si on s'en réfère au décret du 21 Mai 1957 d'approbation de la convention de concession de la section Pujet-sur-Argens à Villeneuve-Loubet (J.O du 29 Mai 1957 page 5381). C'est également le cas des ponts de l'autoroute A6 à la sortie de Paris construits vers les années 58 / 60. Les ponts de ces deux itinéraires ont été dimensionnés pour le passage du convoi de 4ème classe de la circulaire de 1946.

En l'absence de règles sur le sujet, il est donc apparu nécessaire de fixer des hypothèses de calcul les plus réalistes possibles.

Tout d'abord, il a été recherché **un modèle de chargement** (cf. chapitre 2) permettant de combiner les effets du P.E.B. avec les effets du trafic fréquent (période de retour comprise entre 1 jour et une semaine). Ce modèle de chargement s'inspire des dispositions de la partie 3 du futur Eurocode 1 (article 4.3.4) qui traite la question des charges concomitantes aux "véhicules spéciaux" (convois militaires et exceptionnels).

Ensuite, après analyse des différentes et très nombreuses règles de charge et de calcul des ouvrages, il a été recherché par des tests (cf. chapitre 5) s'il n'était pas possible d'éviter un recalcul complet de tous les ouvrages sous le modèle de chargement.

Cette démarche a permis d'aboutir dans un certain nombre de cas à **une simple comparaison entre les sollicitations engendrées par le P.E.B. mêlé au trafic courant et les sollicitations dues aux charges de calcul** (cf. § 1.2) sous réserve que les conditions de circulation du paragraphe 1.3 soient strictement respectées.

Malheureusement, la démarche a également montré que **certains ouvrages ne pouvaient être vérifiés de cette manière**, d'une part à cause de certaines insuffisances des règles de charge ou de calcul (cf. 1.2.2), et d'autre part parce que les règles de calcul les plus anciennes n'assurent pas toujours la force portante de l'ouvrage vis à vis d'une accumulation de véhicules engendrant un dépassement du modèle de chargement (pour ces règlements il n'y avait pas de vérification vis à vis des Etats-Limites Ultimes). Or il est indispensable que, dans ce cas, la sécurité soit assurée vis à vis des Etats-Limites Ultimes (cf. § 3.2.2).

Pour aider les gestionnaires d'ouvrages, il a également été élaboré un mode d'emploi du guide (chapitre 3) et tous les règlements de charge et de calcul ont été listés et rassemblés (chapitre 4).

Enfin, au chapitre 5 et en annexe, sont explicités les tests effectués et leurs résultats.

Le lecteur qui souhaite effectuer un recalcul complet d'un ouvrage sous le passage du P.E.B. mêlé au trafic fréquent peut se contenter de la lecture du chapitre 2.

1.2. Principes à suivre pour la vérification de la charge portante d'un ouvrage.

1.2.1. Principes de vérification.

La vérification d'un ouvrage "**en bon état"** consiste donc à comparer les sollicitations développées dans toutes les parties de l'ouvrage (dalle, entretoises, poutres, appuis...) par le P.E.B. mélangé au trafic concomitant, aux sollicitations développées par les charges civiles et/ou militaires en vigueur à l'époque de la construction de l'ouvrage.

Dans le cas où des dépassements apparaissent, où lorsque la sécurité vis à vis des E.L.U. risque de ne pas être assurée (cf. § 3.2.2) **"un recalcul complet"** est nécessaire **(ce n'est pas l'objet du présent guide, même si on y trouve de nombreuses informations pertinentes notamment au chapitre 4).**

1.2.2. "Pièges" à éviter.

Dans la pratique, la comparaison des sollicitations n'est pas aussi simple que cela car :

- d'une part, la réglementation concernant les charges et le calcul des structures a constamment évolué ces cinquante dernières années ;
- et d'autre part, pendant la période de validité d'un règlement, de nombreuses circulaires sont venues le modifier ou le compléter.

Au total une cinquantaine de textes divers et variés figurent dans le tableau chronologique tous règlements confondus, au paragraphe 4.1 ci-après !

Parmi les "pièges" qui rendent la simple comparaison des sollicitations évoquée ci-avant délicate, il est possible de citer à titre d'exemples :

- la décision ministérielle des 8 et 10 Décembre 1962 sur le programme des surcharges réglementaires des ponts portant autoroutes qui imposait de placer le char de 100 tonnes sur la bande d'arrêt d'urgence (B.A.U.) vis à vis de la flexion transversale, mais l'interdisait vis à vis de la flexion longitudinale (poutraison principale).
Cette pratique a ensuite été modifiée par le titre II du fascicule 61 du cahier des prescriptions communes (C.P.C.) de 1971.

*Remarque : Certains ouvrages dont la chaussée a été élargie par suppression de **la bande d'arrêt d'urgence** pourraient présenter des insuffisances puisque le P.E.B. est supposé circuler sur la voie de droite qui de ce fait est l'ancienne bande d'arrêt d'urgence.*

- les ouvrages hyperstatiques en béton précontraint antérieurs aux années 70/75 et tout particulièrement ceux construits par phases qui ont été souvent conçus sans tenir compte des gradients thermiques et des redistributions d'efforts par déformations différées gênées (fluage).

- les dépassements de contraintes autorisés sous les charges militaires par exemple par la circulaire du 5 Mai 1939. Cette pratique s'est prolongée jusqu'en 1960 pour les parties métalliques des ponts métal. De même la circulaire du 71-156 du 30 décembre 1971 modifiant l'IP 1 autorisait des tractions dans le béton sous les charges militaires.

Remarque : A priori, on peut considérer que les dérogations autorisées pour le passage de charges militaires circulant seules sur les ouvrages ne sont plus applicables dès lors que les charges militaires sont mélangées aux charges civiles.
Cependant, on distinguera par la suite plusieurs types de dérogations (augmentation des contraintes admissibles, autorisation de tractions dans le béton précontraint avec mise en place d'armatures pour équilibrer les efforts de tractions, etc.) dont certaines pourront être considérées comme acceptables sous réserve de justifications particulières (cf. § 3.2.3 et chapitre 4)

1.2.3. Tests effectués.

Le groupe de travail a effectué des calculs portant sur un certain nombre d'ouvrages non courants et d'ouvrages types pour tester **"le modèle de chargement".**

Ces tests ont montré que la cohabitation du convoi de P.E.B. et du trafic était possible dans les cas étudiés.

"Bien entendu, il est impossible de généraliser les conclusions de ces tests à l'ensemble des ouvrages du réseau autoroutier. La responsabilité en incombe aux gestionnaires qui doivent faire vérifier la force portante de tous les ouvrages concernés par le passage du P.E.B". (il est cependant possible d'extrapoler à une série d'ouvrages en bon état, d'âge, de conception et de caractéristiques identiques les résultats du recalcul d'un des ouvrages de la série).

Il est vivement conseillé aux gestionnaires de confier la vérification de leurs ouvrages, conçus avec des règlements obsolètes et/ou en mauvais état, à des ingénieurs expérimentés et ayant une bonne connaissance des règles et des pratiques passées.

1.3. Conditions de circulation.

En conclusion de ce qui précède, les conditions de circulation imposées dans le présent guide au P.E.B. pour assurer la pérennité des ouvrages doivent être impérativement respectées.

Bien entendu, s'y ajoutent les dispositions à respecter pour limiter la gêne aux usagers et assurer leur sécurité, qui peuvent être parfois plus exigeantes (cf. la convention nationale déjà citée).

- Le P.E.B. ne va pas sur la bande d'arrêt d'urgence (B.A.U.);

- Le P.E.B. circule à vitesse normale sur la voie de droite[1] ;

- Le dépassement ou le croisement d'un P.E.B., même à l'arrêt, par un autre P.E.B. est impérativement interdit ;

- L'espacement minimal entre deux P.E.B. à appliquer dans les calculs est de 25 mètres[2] ;

- Le passage du P.E.B. est impérativement interdit dans le cadre du basculement des deux sens de circulation sur un pont pour cause de travaux (cf. circulaire de la Direction des Routes du 29 août 1991) ;

- Le nombre de passages de P.E.B. sur un pont métallique calculé ou non vis à vis de la fatigue est en moyenne inférieur ou égal à 1 par jour (360 P.E.B. par an). Au delà de cette valeur des justifications doivent être effectuées (il s'agit bien de 1 P.E.B. par jour et non pas de 1 convoi de P.E.B. par jour).

[1] Il peut être envisagé de faire circuler le P.E.B. sur la voie de gauche de certains tronçons autoroutiers où les anciens ponts ont été élargis. Leur voie de droite se trouve alors à l'emplacement de l'ancienne B.A.U. non prévue pour supporter les convois militaires lourds (cf. le § 1.2 ci-avant).
Cette règle de circulation peut également être envisagée sur certains tronçons où, pour des raisons de sécurité et de fluidité du trafic, il faut éviter de bloquer les nombreuses voies d'accès et de sortie.

[2] Sur certains tronçons, si la vérification de la charge portante des ouvrages n'est pas assurée avec cet espacement minimum, il peut être augmenté. Dans un tel cas, des consignes drastiques doivent être données aux responsables des convois pour respecter scrupuleusement le nouvel espacement minimal ainsi fixé.

2. HYPOTHESES DE CALCUL.

Les présentes règles définissent les hypothèses de calculs à retenir pour effectuer une vérification d'ouvrage autoroutier sous passage d'un convoi de P.E.B.

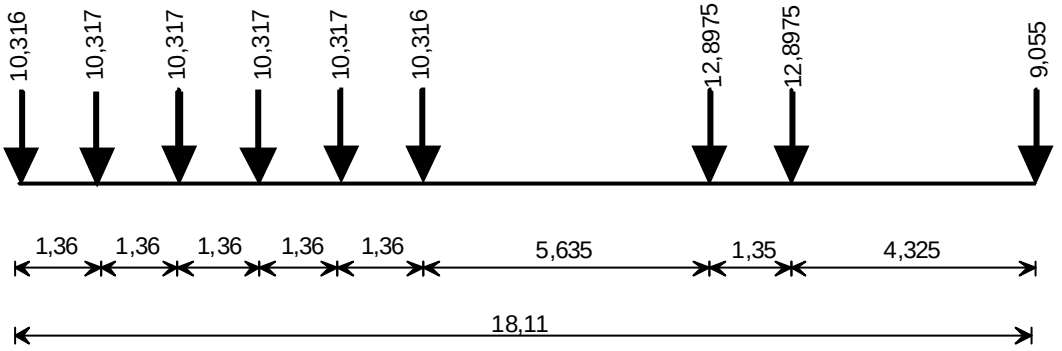
Ces règles ne s'appliquent pas aux ponts de longueur de travée supérieure à 200 mètres (article 4.1 de la partie 3 de l'Eurocode 1 et article 4.1 du titre II du fascicule 61 du C.P.C.).

2.1. Charges.

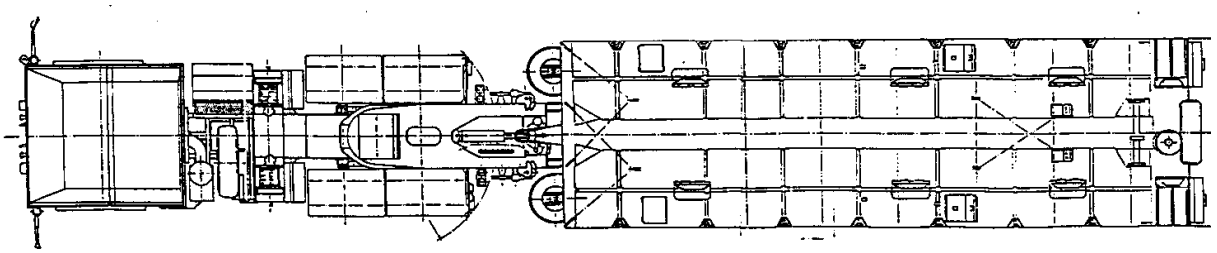
2.1.1. Porte-engins-blindés Leclerc (P.E.B.).

Par la suite la charge du P.E.B. sera notée : $Q_{[PEB]}$

Schéma du P.E.B. en charge : $Q_{[PEB]}$ = 97 tonnes



élévation



vue en plan

Conformément à l'esprit de l'article 4.4 de la circulaire R/EG.3 du 20 juillet 1983 sur les transports exceptionnels, la charge $Q_{[PEB]}$ **doit être pondérée par 1,1**. Ce coefficient est destiné à couvrir les déséquilibres de charges sur les essieux dus à la non-planéité, aux pentes des chaussées ou aux tolérances de positionnement du colis, ainsi que les incertitudes sur son poids réel. Ce coefficient est à appliquer avant les autres coefficients de pondération des règlements.

Il est à noter que les véhicules spéciaux de la partie 3 de l'Eurocode 1 sont supposés rouler à moins de 5 km/h, en conséquence de quoi il n'est pas nécessaire de considérer une majoration dynamique (cf. règle d'application (3) (b) de l'article 4.3.4). La note de la règle d'application (3) (c) du même article précise cependant que l'autorité compétente peut autoriser des vitesses supérieures à 5 Km/h si la majoration dynamique et les forces horizontales associées sont spécifiées.

Or le convoi peut atteindre près de 70 km/h en palier. **Le coefficient de majoration dynamique doit donc être pris en compte**. Ce dernier, en l'absence de valeur donnée par l'Eurocode 1 sera calculé avec la formule de l'article 5.5 du titre II fascicule 61 du C.P.C. :

$$\delta = 1 + \alpha + \beta = 1 + \frac{0,4}{1 + 0,2\ L} + \frac{0,6}{1 + 4\frac{G}{S}}$$

d'où la charge de calcul : $Q_d = 97 \times 1,1 \times \delta$

2.1.2. Charges concomitantes.

Les charges concomitantes proposées ci-dessous permettent de combiner les effets du P.E.B. avec les effets d'un trafic fréquent (période de retour comprise entre 1 jour et une semaine). Ce modèle de chargement s'inspire des dispositions de l'Eurocode 1.

La partie 3 de l'Eurocode 1 traite des charges concomitantes aux véhicules "spéciaux" (convois militaires et exceptionnels). Les charges concomitantes sont celles du modèle de charge 1 au sens de l'article 4.3.2 de la partie 3 de l'Eurocode 1.

Ces charges de l'article 4.3.2 doivent être pondérées par les coefficients de combinaison ψ_0 qui traduisent la concomitance de ces charges (actions variables d'accompagnement) avec le P.E.B. considéré comme action variable de base.

Ces coefficients ψ_0 sont ceux du tableau C2 de l'annexe C de la partie 3 de l'Eurocode 1 et non ceux donnés aux annexes 8 du BPEL et D du BAEL. Les valeurs du coefficient ψ_0 sont bien les mêmes que celles du coefficient ψ_1 correspondant aux charges fréquentes (ψ_0 = 0,4 pour les charges réparties et ψ_0 = 0,75 pour les tandems).

Ces charges pondérées par ψ_0 seront notées par la suite : $\boxed{Q_{[1]}}$ Elles comprennent :

a) des charges uniformément réparties (système UDL) sur toutes les voies y compris la bande d'arrêt d'urgence et la voie sur laquelle circule le convoi de P.E.B. Les intensités des charges réparties qui dépendent de l'endroit où elles sont appliquées sont à multiplier par ψ_0 = 0,4 :

⇨ sur la "voie 1" chargée par le convoi de P.E.B. : une charge répartie de 9 x ψ_0 = 3,6 kN/m² appliquée à 25 mètres au moins du P.E.B., à l'avant et à l'arrière du convoi,

⇨ sur les autres voies et sur les aires résiduelles : une charge répartie de 2,5 x ψ_0 = 1 kN/m²

⇨ entre les P.E.B. d'un convoi: pas de charge répartie. Le trafic n'est pas supposé s'intercaler entre les P.E.B. d'un convoi.

b) des tandems de charge d'essieu (tandems TS) placés sur les trois premières voies dont les intensités varient en fonction de la voie chargée et sont à multiplier par ψ_0 = 0,75 :

⇨ sur la "voie 1" chargée par le convoi de P.E.B. : un tandem de charge d'essieu valant 300 x ψ_0 = 225 kN à 25 mètres au moins du P.E.B., à l'avant ou à l'arrière du convoi,

⇨ sur la "voie 2" : un tandem de charge d'essieu valant 200 x ψ_0 = 150 kN.

⇨ sur la "voie 3" : un tandem de charge d'essieu valant 100 x ψ_0 = 75 kN.

⇨ sur les autres voies et sur les aires résiduelles : pas de tandem

Les ouvrages autoroutiers étant de classe de trafic 1 au sens de l'article 4.3.2 (7) du D.A.N (Document d'Application Nationale) de l'Eurocode 1, les **coefficients d'ajustement a_Q et a_q** de l'Eurocode 1 ont été pris égaux à 1.

Remarque : le nombre de voies est déterminé en s'inspirant de la partie 3 de l'Eurocode 1, sauf que la voie du P.E.B; vaut 3,50 mètres. Par souci de simplification, la charge du P.E.B. peut également être appliquée sur une voie de 3 mètres de large, ce qui est plus défavorable.

2.1.3. Gradient thermique.

Le gradient thermique concomitant éventuel à appliquer est le **gradient thermique fréquent** d'intensité 6°C, même si le convoi circule de nuit à cause de l'inertie thermique des ouvrages.

Cette action sera notée par la suite : $\boxed{Q_{[grad=6]}}$

2.2. Combinaisons à considérer.

a) E.L.U. - combinaisons fondamentales.

Selon l'article 7.2.1.1 des Directives Communes de 1979, les sollicitations de calcul à considérer sont : $\gamma_{F3}\, S\, (\gamma_{F1\,GMAX}\, G_{MAX} + \gamma_{F1\,GMIN}\, G_{MIN} + \gamma_{F1\,Q1}\, Q_{1k} + \gamma_{F1\,Qi} \sum_{i>1} \psi_{oi} Q_{ik})$

soit dans notre cas $S \left\{ 1{,}35\, G_{MAX} + G_{MIN} + 1{,}35\, Q_{[PEB]\times 1{,}1\times\delta} + 1{,}3\, Q_{[1]} \right\}$ *(En effet le gradient thermique n'est pas à prendre en compte à l'E.L.U., cf. le tableau D.2.1.1 de l'annexe D du BAEL)*

Par souci de simplification, et pour être cohérent avec l'Eurocode, il sera considéré par la suite,

$$S \left\{ 1{,}35\, G_{MAX} + G_{MIN} + 1{,}35\, (Q_{[PEB]\,x\,1{,}1\,x\,\delta} + Q_{[1]}) \right\}$$

Il est possible de considérer que $(Q_{[PEB]\times 1{,}1\times\delta} + Q_{[1]})$ constitue un groupe de charges au

sens de l'article 4.5 de l'Eurocode, qui sera noté par la suite : $Q_{([PEB] \times 1{,}1 \times d + [1])}$

Il est alors possible d'écrire : $S\left\{ 1{,}35\, G_{MAX} + G_{MIN} + 1{,}35\, Q_{([PEB] \times 1{,}1 \times d + [1])} \right\}$

b) E.L.S. - combinaisons rares.

Selon l'article 7.3.1 des Directives Communes de 1979, les sollicitations de calcul à considérer sont : $S\left(G_{MAX} + G_{MIN} + Q_{1k} + \sum_{i>1} \psi_{oi} Q_{ik} \right)$, soit en conservant la notation précédente :

$$S\left\{ G_{MAX} + G_{MIN} + Q_{([PEB] \times 1{,}1 \times d + [1])} + (1 \text{ ou } 0)\, Q_{[grad=6]} \right\}$$

c) E.L.S. - combinaisons fréquentes.

Compte tenu du nombre de passages de convois de P.E.B., il n'y a pas lieu d'étudier des combinaisons fréquentes avec le P.E.B. considéré comme action variable de base.

Remarque 1 : Pour les vérifications des appuis et de certaines structures (portiques, etc.) il y a lieu de considérer également les autres actions thermiques concomitantes (cf. §3.2.7).

Remarque 2 : s'il s'agit d'un ouvrage métallique pour lequel les DC 71 sont applicables, il est loisible d'adapter les coefficients.

2.3. Cas de chargements.

2.3.1. Conditions à respecter.

La prise en compte des cas de chargement développés ci-après impose de respecter les points suivants (cf. paragraphe 3.1) :

- le bon état de l'ouvrage ;
- l'absence de modifications, telles que l'augmentation du nombre des voies, avec ou sans élargissement, l'augmentation du poids des superstructures... (si des modifications importantes ont eu lieu un recalcul complet de la structure s'impose) ;
- pour certains ouvrages en béton précontraint, la prise en compte des gradients thermiques (ouvrages hyperstatiques) et/ou des redistributions d'efforts par déformations différées gênées (ouvrages hyperstatiques et construits par phases).

2.3.2. Conditions de circulation du P.E.B. prises en compte comme hypothèses de calculs.

Rappel du paragraphe 1.3 :

- Le P.E.B. ne va pas sur la bande d'arrêt d'urgence (B.A.U.) ;
- Le P.E.B. circule à vitesse normale sur la voie de droite[1] ;
- Le dépassement ou le croisement d'un P.E.B., même à l'arrêt, par un autre P.E.B. est impérativement interdit ;
- L'espacement minimal entre deux P.E.B. à appliquer dans les calculs est de 25 mètres[2] ;
- Le passage du P.E.B. est impérativement interdit dans le cadre du basculement des deux sens de circulation sur un pont pour cause de travaux ;
- Le nombre de passages de P.E.B. sur un pont métallique calculé ou non vis à vis de la fatigue est en moyenne inférieur ou égal à 1 par jour. Au delà de cette valeur des justifications doivent être effectuées. (Il s'agit bien de 1 P.E.B. par jour et non pas de 1 convoi de P.E.B. par jour).

Même si les problèmes de sécurité et de gêne aux usagers interdisent par exemple, sur une chaussée à deux voies de circulation avec ou sans B.A.U. le doublement du P.E.B. par les poids lourds, le contrôle de la force portante des ouvrages doit quand même être effectué avec les cas de charges ci-après sans réduire la charge sur la seconde voie.

[1] Il peut être envisagé de faire circuler le P.E.B. sur la voie de gauche de certains tronçons autoroutiers où les anciens ponts ont été élargis. Leur voie de droite se trouve alors à l'emplacement de l'ancienne bande d'arrêt non prévue pour supporter les convois militaires lourds (cf. le § 1.2 ci avant).
Cette règle de circulation peut également être envisagée sur certains tronçons où, pour des raisons de sécurité et de fluidité du trafic, il faut éviter de bloquer les nombreuses voies d'accès et de sortie.

[2] Sur certains tronçons, si la vérification de la charge portante des ouvrages n'est pas assurée avec cet espacement minimum, il peut être augmenté. Dans un tel cas, des consignes drastiques doivent être données aux responsables des convois pour respecter scrupuleusement le nouvel espacement minimal ainsi fixé.

2.3.3. Les cas de charge à considérer pour le P.E.B. et les charges routières concomitantes.

Pour un convoi de P.E.B. et les charges routières concomitantes, les dessins ci-après synthétisent à travers des exemples les cas de charge à considérer.

Légende :

P.E.B. x 1,1 x δ

zones chargées uniformément avec une charge q = 3,6 kN / m²

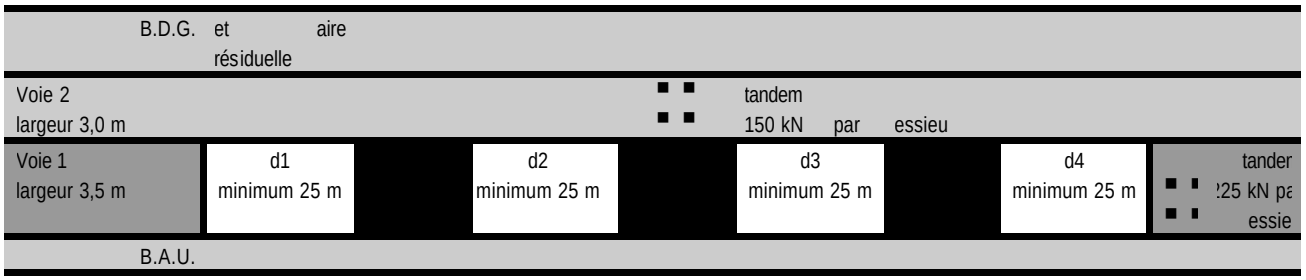
zones chargées uniformément avec une charge q = 1,0 kN / m²

zones non chargées

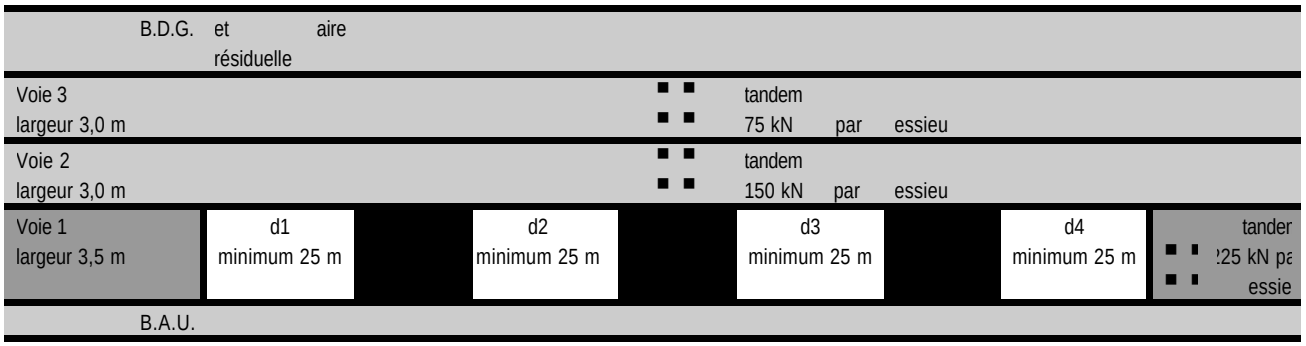
Remarques :

- Transversalement la voie 1 est la voie la plus à droite (hors BAU).
- Les positions longitudinales des tandems sont données à titre indicatif. Le tandem à 225 kN par essieu peut être placé à l'avant ou à l'arrière du convoi.
- Les numérotations et les positions des voies 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8 sont données à titre indicatif, ces voies devant être placées de la façon la plus défavorable vis à vis de l'effet étudié.
- Les dessins ont été faits dans le cas de 3 P.E.B., mais il n'y a pas de limite sur ce nombre. Il convient d'envisager tous les cas physiquement possibles en faisant varier les distances "di" entre les P.E.B.
- La largeur des voies de circulation est prise égale à 3 mètres, conformément à l'Eurocode, cependant pour la voie 1 supportant le P.E.B., une largeur de 3,50 mètres a été retenue compte tenu de la largeur réelle de la remorque chargée (3,44 mètres).

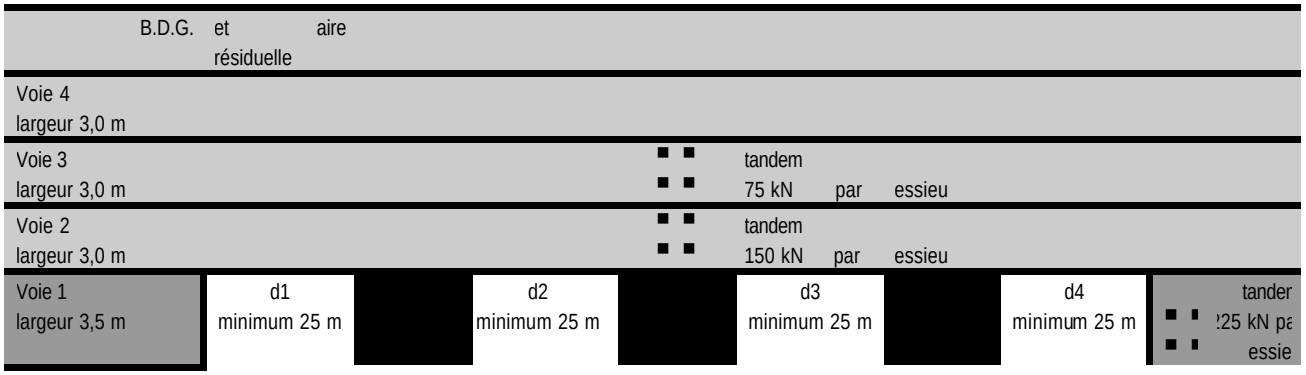
Cas des ponts portant une seule chaussée unidirectionnelle



exemple d'une chaussée unidirectionnelle à deux voies avec 3 P.E.B.



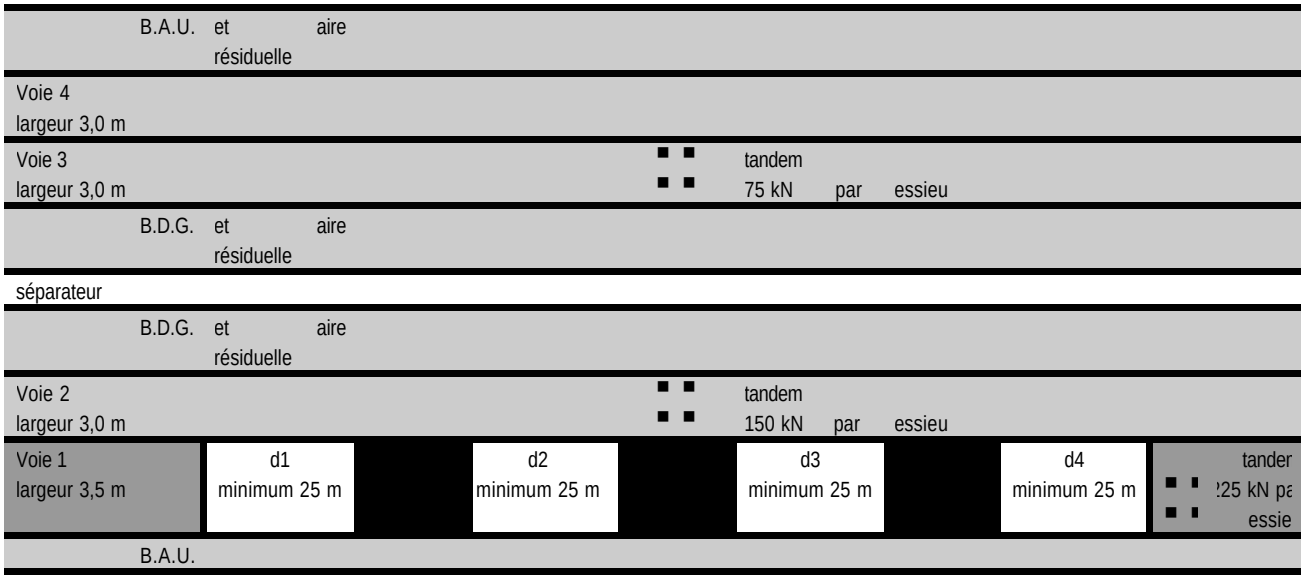
exemple d'une chaussée unidirectionnelle à trois voies avec 3 P.E.B.


B.D.G. et aire résiduelle
Voie 4 largeur 3,0 m
Voie 3 largeur 3,0 m
tandem 75 kN par essieu
Voie 2 largeur 3,0 m
tandem 150 kN par essieu
Voie 1 largeur 3,5 m
d1 minimum 25 m
d2 minimum 25 m
d3 minimum 25 m
d4 minimum 25 m
tander

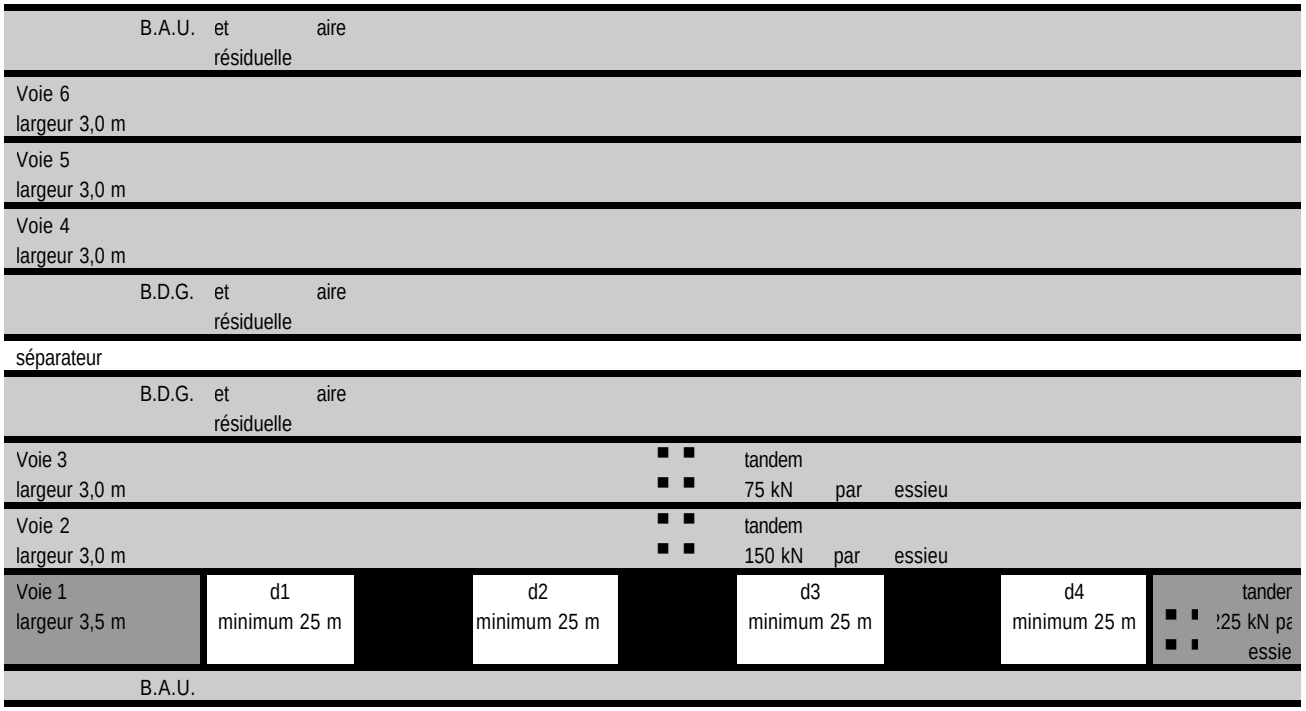
exemple d'une chaussée unidirectionnelle à quatre voies avec 3 P.E.B.

Cas des ponts portant deux chaussées unidirectionnelles

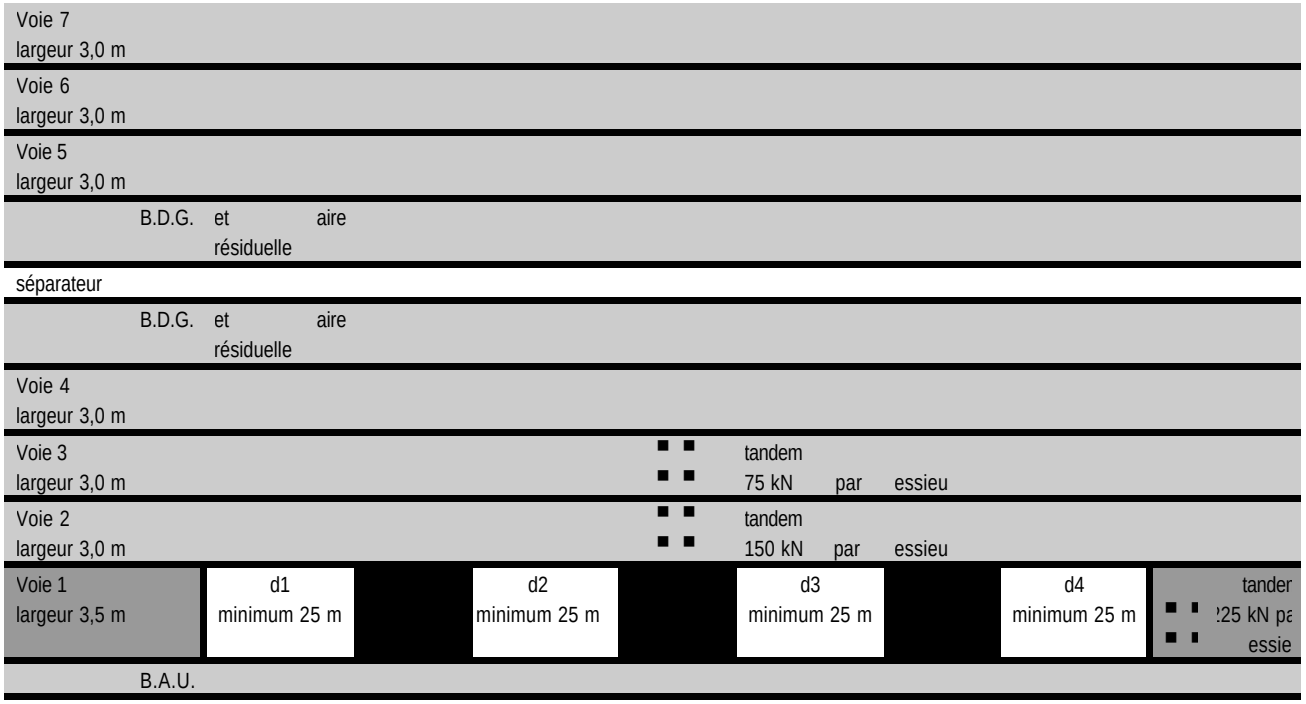
Cf. partie 3 de l'Eurocode 1 (règles d'application).
- § 4.2.3. (3) (a) définissant le découpage de la chaussée en voie dans le cas d'un séparateur central fixe,
- § 4.2.4. (5) du définissant l'emplacement et la numérotation des voies pour les besoins des calculs.


B.A.U. et aire résiduelle
Voie 4 largeur 3,0 m
Voie 3 largeur 3,0 m
tandem 75 kN par essieu
B.D.G. et aire résiduelle
séparateur
B.D.G. et aire résiduelle
Voie 2 largeur 3,0 m
tandem 150 kN par essieu
Voie 1 largeur 3,5 m
d1 minimum 25 m
d2 minimum 25 m
d3 minimum 25 m
d4 minimum 25 m
B.A.U.

exemple d'une chaussée bidirectionnelle à deux fois deux voies avec 3 P.E.B.


B.A.U. et aire résiduelle
Voie 6 largeur 3,0 m
Voie 5 largeur 3,0 m
Voie 4 largeur 3,0 m
B.D.G. et aire résiduelle
séparateur
B.D.G. et aire résiduelle
Voie 3 largeur 3,0 m
tandem 75 kN par essieu
Voie 2 largeur 3,0 m
tandem 150 kN par essieu
Voie 1 largeur 3,5 m
d1 minimum 25 m
d2 minimum 25 m
d3 minimum 25 m
d4 minimum 25 m
B.A.U.

exemple d'une chaussée bidirectionnelle à deux fois trois voies avec 3 P.E.B.



exemple d'une chaussée bidirectionnelle à deux fois quatre voies avec 3 P.E.B.

3. MODE D'EMPLOI DU GUIDE.

L'objet de ce chapitre est de préciser la démarche à suivre pour utiliser le présent guide dans le cadre de la vérification d'un ouvrage existant sous passage d'un convoi de P.E.B.

3.1. La démarche à suivre.

La première étape est l'analyse du dossier d'ouvrage afin de répondre en particulier aux questions suivantes :

3.1.1. La conception.

- quelle est l'année de construction de l'ouvrage ?

- selon quels règlements l'ouvrage a-t-il été calculé ?

Pour une année donnée, les tableaux du chapitre 4 indiquent les règlements en vigueur, mais qui n'ont pas forcément été utilisés compte tenu de la durée des études, des prises de décision...

- a-t-il fait l'objet de dérogations réglementaires ou particulières ?

Les tableaux du chapitre 4 indiquent également les dérogations générales "réglementaires" applicables aux charges militaires et exceptionnelles (augmentation des contraintes admissibles, ...).

Mais ces informations ne sont pas suffisantes, certains ouvrages ayant fait l'objet de dérogations particulières (ex. un viaduc autoroutier calculé selon l'IP 1, mais en autorisant des tractions en service, ...). C'est pourquoi il est nécessaire de consulter dans le dossier d'ouvrage les documents particuliers du marché (cf. C.C.T.P. ou équivalent).

En particulier, certaines dérogations ont été accordées aux ponts sur les autoroutes concédées (A4, AREA et Cofiroute par exemple).

- l'ouvrage a-t-il été dimensionné pour des charges militaires ou exceptionnelles ?

A priori, comme indiqué au paragraphe 1.2.1 les ouvrages autoroutiers ont été dimensionnés sous les charges militaires.

3.1.2. L'état de l'ouvrage.

- l'ouvrage est-il en bon état ?

C'est à dire est-il classé dans les catégories 1 ou 2 au sens de l'I.Q.O.A.(Image de la Qualité des Ouvrages d'Art).

Il s'agit de l'état de l'ouvrage y compris l'état des fondations.

- l'ouvrage a-t-il déjà été réparé ?

Cette question vise les réparations structurelles de l'ouvrage. Ne sont pas concernés par exemple les ragréages locaux, etc.

Ces réparations ont-elles fait l'objet de justifications par le calcul ?

- l'ouvrage a-t-il déjà été modifié ?

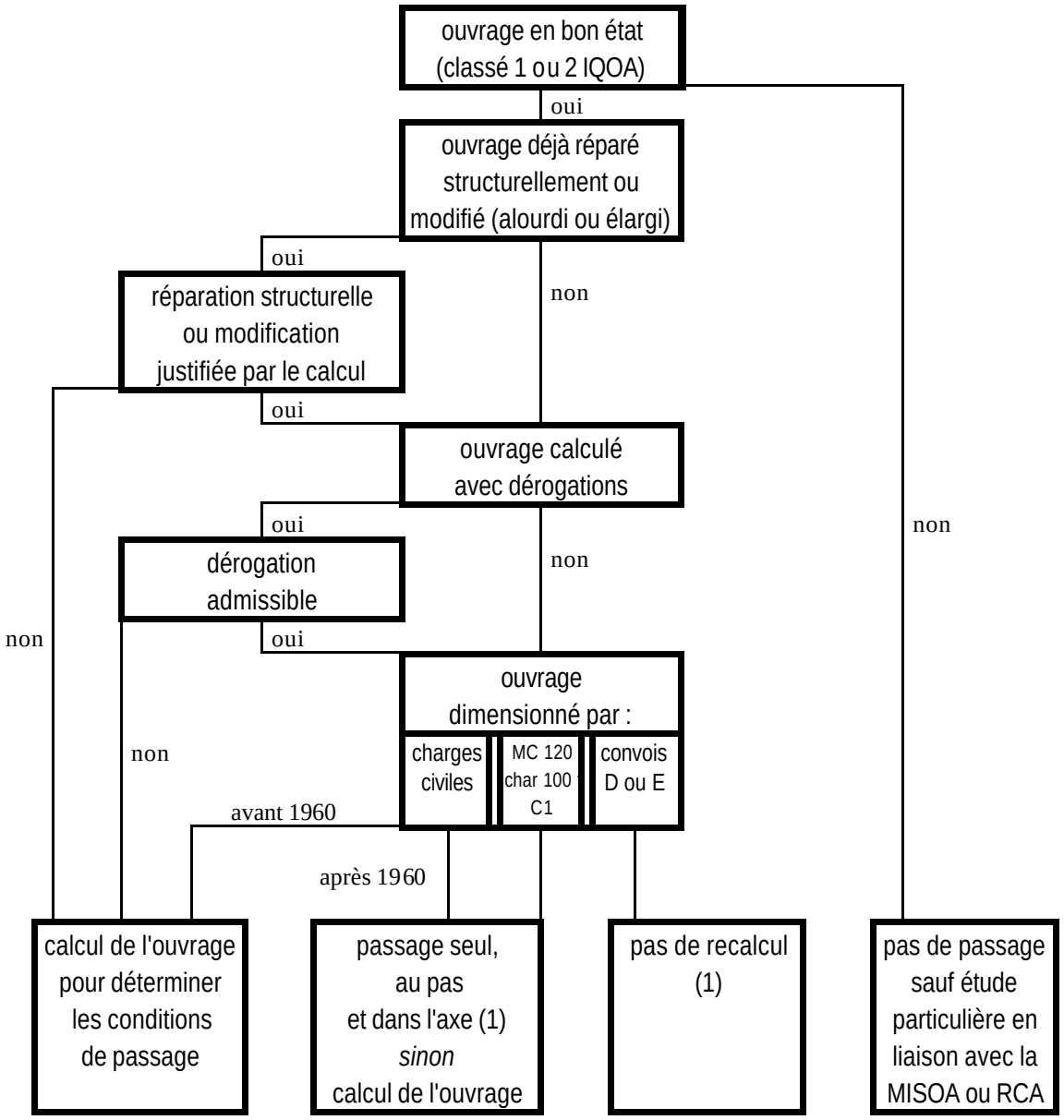
Ces modifications peuvent être de deux sortes

- alourdissement des équipements,
- élargissement par suppression ou diminution de la B.A.U. d'urgence,...)

Ces modifications ont-elles fait l'objet de justifications par le calcul ?

3.1.3. Organigramme décisionnel.

Une fois ces informations recueillies, l'organigramme ci-dessous indique la démarche à suivre.



(1) sauf s'il existe des insuffisances de calcul connues concernant le type d'ouvrage étudié.

3.2. L'utilisation des tableaux et des informations du chapitre 4 pour un calcul.

3.2.1. Généralités.

Dans le cas où à l'issue de l'étape précédente un calcul d'ouvrage s'avère nécessaire, deux approches sont envisageables :

a) effectuer en recalcul complet de l'ouvrage selon les règlements actuels.

Ce recalcul doit être effectué avec les aménagements qui s'imposent.

Attention, dans ce cas il faut préalablement s'assurer que les hypothèses des nouveaux règlements sont compatibles avec les dispositions constructives de l'ouvrage. Par exemple, s'il n'y a que très peu d'aciers passifs longitudinaux, il ne faut pas recalculer un ancien pont en béton précontraint selon la classe 2 du BPEL, mais selon la classe 1.

b) comparer des courbes enveloppes de charges d'exploitation.

Le recalcul complet de l'ouvrage peut être très fastidieux. Par exemple dans le cas d'un pont en béton précontraint construit par phases, cette méthode oblige à décrire l'ensemble des câbles et l'ensemble des phases pour déterminer l'état à vide de la structure.

Il est alors intéressant d'effectuer un calcul simplifié, en essayant de se limiter à la comparaison

des sollicitations développées dans toutes les parties de l'ouvrage par le P.E.B. mélangé au trafic concomitant, aux sollicitations développées par les charges civiles et/ou militaires en vigueur à l'époque de la construction de l'ouvrage. Le présent chapitre explique la démarche à suivre pour effectuer un tel calcul simplifié.

Excepté le cas de certaines anciennes dérogations qui ne sont plus retenues et qui seront traitées en particulier dans la suite de ce chapitre, cette approche revient en fait à vérifier l'ouvrage selon le règlement de calcul avec lequel il a été conçu.

Cette comparaison doit, dans certains cas développés au paragraphe suivant, être complété par une étude vis à vis d'une accumulation de véhicules pour que la sécurité vis à vis des E.L.U. soit assurée.

3.2.2. La sécurité vis à vis d'une accumulation de véhicules.

La charge de calcul concomitante du P.E.B. correspond à des charges fréquentes.

La sécurité de l'ouvrage doit être assurée en service (E.L.S.), mais également en cas d'une accumulation de véhicules conduisant à un dépassement de la charge de calcul. Ceci conduit à effectuer une vérification vis à vis de l'E.L.U. fondamental.

a) Cas des ouvrages calculés avec des règlements aux Etats-Limites Ultimes.

Dans ce cas on démontre que si, à l'E.L.S., les combinaisons civiles sont plus défavorables que la combinaison militaire prenant en compte le P.E.B. et le trafic concomitant, elles sont également plus défavorables à l'E.L.U.

Or les combinaisons d'actions E.L.U. couvrent une augmentation des charges due à une accumulation de véhicules.

Pour ce type d'ouvrage, il est possible de se contenter de comparer dans toutes les parties de l'ouvrage avec les coefficients des combinaisons de l'E.L.S.

- les sollicitations développées par le P.E.B. mélangé au trafic fréquent concomitant,
- et les sollicitations développées par les charges civiles et/ou militaires en vigueur à l'époque de la construction de l'ouvrage.

b) Cas des ouvrages calculés avec des règlements aux contraintes admissibles

Pour ces ouvrages il n'est pas évident a priori que la vérification ci-dessus soit suffisante.

Une étude a été menée pour les différents règlements en considérant une proportion de charges d'exploitation variant de 0% à 300% des charges permanentes. Ces tests ont porté sur l'étude du moment fléchissant, de l'effort tranchant et, pour les ouvrages en métal, du flambement.

Les conclusions de cette étude pour les structures simples (autres que ponts en arcs, ponts à béquilles, etc.) sont les suivantes :

Les ouvrages en béton armé

- pour les ouvrages travaillant en flexion simple et calculés avec les règlements de 1964, 1968 et 1970, il est possible de se contenter de comparer dans toutes les parties de l'ouvrage :
  - les sollicitations dues aux charges d'exploitation civiles des combinaisons du 1° genre,
  - et celles dues au P.E.B. mélangé au trafic fréquent concomitant avec les coefficients de l'E.L.S.

- pour les ouvrages calculés avec un règlement plus ancien, ou pour les ouvrages travaillant en flexion composée une étude spécifique vis à vis de l'E.L.U. s'impose.

Les ouvrages en béton précontraint

- pour les ouvrages calculés avec le règlement de 1953 ou avec l'IP1, il n'a pas été possible de tirer des conclusions générales. Une étude spécifique relative à la sécurité sous accumulation de charges doit donc être menée au cas par cas, bien qu'il existe dans l'IP 1 une combinaison "à rupture" ($M_G + 1{,}8\ M_Q$).

Les ouvrages en métal

- pour les ouvrages calculés avec les règlements de 1960 et 1970, il est possible de se contenter de comparer dans toutes les parties de l'ouvrage :
  - les sollicitations dues aux charges d'exploitation des combinaisons en service,
  - et celles dues au P.E.B. mélangé au trafic fréquent concomitant avec les coefficients de l'E.L.S.

- pour les ouvrages calculés avec un règlement plus ancien, une étude spécifique s'impose.

Pour les ouvrages anciens, pour lesquels une étude spécifique s'impose sous l'effet d'une accumulation de charges, la combinaison à considérer est celle du paragraphe 2.2.a.

3.2.3. Rappels sur les différents types de coefficients de pondération et de majoration.

Il existe différents types de coefficients de pondération ou de majoration.

Certains de ces coefficients concernent les actions. Par exemple :
- les coefficients de majoration dynamique,
- les coefficients a1, a2, bc, bt du titre II fascicule 61,
- le coefficient 1,1 appliqué au P.E.B. et plus généralement aux convois exceptionnels dans la circulaire de 1983 [3],
- les coefficients 1,1 ("intégrité du béton") et 1,8 ("rupture") à affecter aux valeurs nominales pour obtenir les charges de calcul de l'IP 1,
- les coefficients 1,2 (E.L.S.) et 1,07 (E.L.U.) à affecter aux valeurs nominales pour obtenir les charges de calcul du BAEL et du BPEL.

Dans la suite de ce document, ces coefficients seront mis en indice.
(exemple : $S [G + Q_{[A(l)] \times 1,2}]$ pour le BAEL 91).

D'autres coefficients concernent les sollicitations. Par exemple :
- les coefficients 1,35 ou 1,5 à retenir vis à vis de l'ELU pour le BAEL 91 et le BPEL 91,
- le coefficient 1,2 à retenir pour les sollicitations du 1° genre pour le règlement de béton armé de 1964.

Dans la suite de ce document, ces coefficients ne seront pas mis en indice.
(exemple : $S [G + 1,2\ Q_{[A(l)]}]$ pour le règlement de béton armé de 1964).

3.2.4. Cas d'un ouvrage "en bon état" dimensionné sans dérogations (ou avec dérogation acceptable).

La vérification d'un ouvrage "**en bon état"** dimensionné sans dérogation, consiste à **comparer les sollicitations développées dans toutes les parties de l'ouvrage (dalle, entretoises, poutres, appuis...) par le P.E.B. mélangé au trafic concomitant, aux sollicitations développées par les charges civiles et/ou militaires en vigueur à l'époque de la construction de l'ouvrage.**

Les différents tableaux du chapitre 4 précisent les combinaisons d'actions retenues par les différents règlements.

Dans le cas où des dépassements apparaissent, **"un recalcul"** complet, prenant en compte l'état à vide de l'ouvrage, est nécessaire.

Si des insuffisances de calcul sont connues pour le type d'ouvrage considéré, le calcul doit prendre en compte cette insuffisance (par exemple problème du gradient thermique pour les ouvrages en béton précontraint antérieurs à 1975).

Pour chaque tableau du chapitre 4, sont listées les principales insuffisances de calcul connues.

Eventuellement, ces calculs doivent être complétés **par une étude sous accumulation de charges** (cf. § 3.2.2)

Exemple 1 :
Pont en béton précontraint construit en 1986, dimensionné sous le char MC 120 (noté $Q_{[Mc120]}$).

Pour cette année de construction, le tableau du paragraphe 4.3 relatif aux ouvrages en béton précontraint apprend que l'ouvrage a théoriquement été calculé selon le titre II fascicule 61 et selon le BPEL 83, c'est à dire avec les combinaisons d'actions actuelles.

Le paragraphe 4.3 ne mentionne pas d'insuffisance réglementaire connue ou de dérogation relative aux charges militaires.

Le calcul de justification peut se borner à la comparaison des courbes enveloppes suivantes :
- effet des charges civiles,
- effet du P.E.B. et du trafic concomitant.

Pour les charges civiles, il n'est pas nécessaire de considérer le gradient thermique, puisque dans ce cas il interviendrait dans les deux enveloppes et disparaîtrait par soustraction. Par contre il faut le

prendre en compte pour la comparaison avec les sollicitations dues au char MC 120.

Il suffit de vérifier : $S\,[\,Q_{[1]+([P.E.B.]\times 1,1\times\delta)}\,] \leq S\,[\,Q_{[A(l)]\times 1,2}\,]$

ou $S\,[\,Q_{[1]+([P.E.B.]\times 1,1\times\delta)}\,] \leq S\,[\,Q_{[B]\times b\times 1,2\times\delta}\,]$

ou $S\,[\,Q_{[1]+([P.E.B.]\times 1,1\times\delta)} + (1 \text{ ou } 0)\,Q_{[grad=6]}\,] \leq S\,[\,Q_{[Mc120]\times\delta}\,]$

<u>Remarque :</u> il est à noter que le coefficient de majoration dynamique " $_d$ " doit être appliqué au char MC 120 comme au P.E.B. Au contraire, pour les charges routières concomitantes les valeurs proposées par l'Eurocode intègrent déjà la majoration dynamique.

Si aucune inégalité n'est vérifiée le convoi ne peut circuler avec un trafic concomitant.

Exemple 2 :

Pont en béton précontraint construit sur cintre et calculé en 1972, dimensionné sous les charges civiles seulement.

Pour cette année de construction, le tableau du paragraphe 4.3 relatif aux ouvrages en béton précontraint apprend que l'ouvrage a théoriquement été calculé selon le titre II fascicule 61 de 1971 et selon l'IP 1 (charges civiles = charges nominales pondérées par 1,1 d'après le tableau du paragraphe 4.3).

Il faut donc comparer les sollicitations développées par le P.E.B. mélangé au trafic concomitant, aux sollicitations développées par les charges civiles en vigueur à l'époque de la construction de l'ouvrage.

D'autre part, pour ce type d'ouvrage, le paragraphe 4.3 signale une insuffisance réglementaire connue, la non prise en compte du gradient thermique.

Le calcul de justification doit prendre en compte cette insuffisance.

L'ouvrage n'ayant pas été dimensionné selon les charges militaires, il est inutile de considérer les dérogations évoquées dans le paragraphe 4.3.

Le calcul en service peut se borner à la comparaison des courbes enveloppes suivantes :

- effet des charges civiles,
- effet du P.E.B. et du trafic concomitant et du gradient thermique de 6° lorsqu'il est défavorable.

$S\,[\,Q_{[1]+([P.E.B.]\times 1,1\times\delta)} + (1 \text{ ou } 0)\,Q_{[grad=6]}\,] \leq S\,[\,Q_{[A(l)]\times 1,1}\,]$

ou $S\,[\,Q_{[1]+([P.E.B.]\times 1,1\times\delta)} + (1 \text{ ou } 0)\,Q_{[grad=6]}\,] \leq S\,[\,Q_{[B]\times b\times 1,1\times\delta}\,]$

Si aucune inégalité n'est vérifiée le convoi ne peut circuler avec un trafic concomitant.

Cette vérification doit être complétée par une étude sous accumulation de charges (cf. § 3.2.2). Il est possible de se contenter de vérifier que :

$S\left\{1,35\,G_{MAX} + G_{MIN} + 1,35\,Q_{([PEB]\times 1,1\times\delta+[1])}\right\} \leq S\left\{G + 1,8\,Q\right\}$, sinon un recalcul complet s'impose (G + 1,8 Q correspond à la combinaison "à rupture" de l'I.P. 1).

Exemple 3 :

Pont en béton précontraint construit par encorbellements successifs en 1972.

Pour cette année de construction, le tableau du paragraphe 4.3 relatif aux ouvrages en béton précontraint apprend que l'ouvrage a théoriquement été calculé selon le titre II fascicule 61 de 1971 et selon l'IP 1.

Il faut donc comparer les sollicitations développées par le P.E.B. mélangé au trafic concomitant, aux sollicitations développées par les charges civiles et/ou militaires en vigueur à l'époque de la construction de l'ouvrage.

D'autre part, pour ce type d'ouvrage, le paragraphe 4.3 signale deux insuffisances de calcul connues, la non prise en compte du gradient thermique et la non prise en compte des déformations différées gênées (effet du fluage).

Le calcul de justification doit prendre en compte ces deux insuffisances.

Dans ce cas il n'est plus possible de se borner à comparer des courbes enveloppes.

Pour prendre en compte correctement l'effet du fluage, il est nécessaire de connaître l'état à vide, et donc de <u>procéder à un recalcul complet de l'ouvrage (E.L.S. et E.L.U.)</u>.

3.2.5. <u>Cas d'un ouvrage dimensionné avec dérogations.</u>

Il existe plusieurs types de dérogations, dont certaines peuvent être considérées comme acceptables, mais doivent faire l'objet de justifications particulières.

Le chapitre 4 précise les dérogations réglementaires qui peuvent être jugées acceptables et celles qui ne peuvent pas l'être.

En ce qui concerne les dérogations non réglementaires particulières à un marché, il n'est pas possible de les recenser ici. Chaque cas doit faire l'objet d'une réflexion particulière.

a) dérogations inacceptables.

Les dérogations "militaires".

Des dépassements de contraintes admissibles habituelles étaient autorisés sous les charges militaires, par exemple par la circulaire du 5 Mai 1939. Cette pratique s'est prolongée jusqu'en 1960 pour les parties métalliques des ponts métal et jusqu'en 1970 pour les autres types d'ouvrages.

A priori, on peut considérer que les dérogations autorisées pour le passage de charges militaires circulant seules sur les ouvrages, ne sont plus applicables dès lors que ces charges militaires sont mélangées à des charges civiles.

Exemple 1 : Cas d'un pont en béton armé construit en 1965 dimensionné sous le char de 100 tonnes (noté $Q_{[rp100]}$) du convoi militaire de 4ème classe.

Pour cette année de construction, le tableau du paragraphe 4.2 relatif aux ouvrages en béton armé apprend que l'ouvrage a théoriquement été calculé selon le titre II fascicule 61 de 1960 et selon le règlement de calcul de béton armé de 1964 (les sollicitations sous les charges civiles et militaires sont pondérées par 1,2).

Il faut donc comparer les sollicitations développées par le P.E.B. mélangé au trafic concomitant, aux sollicitations développées par les charges civiles et/ou militaires en vigueur à l'époque de la construction de l'ouvrage.

Pour ce type d'ouvrage, le paragraphe 4.2 ne signale pas d'insuffisance réglementaire connue.

Enfin, la seule dérogation en vigueur à l'époque de la construction, observée dans le tableau du paragraphe 4.2 concerne la majoration de 20% des contraintes admissibles.

Il convient de commencer par comparer les courbes enveloppes suivantes :
- effet des charges civiles pondérées par 1,2 (1° genre),
- effet du P.E.B. et du trafic concomitant.

$$S\left[Q_{[1]+([P.E.B.]\times 1{,}1\times \delta)} \right] \leq S\left[1{,}2\ Q_{[A(l)]} \right]$$

ou $$S\left[Q_{[1]+([P.E.B.]\times 1{,}1\times \delta)} \right] \leq S\left[1{,}2\ Q_{[B]\times \delta} \right]$$

Si aucune de ces inégalités n'est vérifiée, ce qui est probable pour les éléments secondaires (entretoises, pièces de ponts, etc.), il faut alors considérer l'effet du char de 100 tonnes.

Compte tenu de la dérogation de 20% autorisée pour les charges militaires à l'époque, il n'est plus possible de se borner à comparer les effets des charges d'exploitation. La justification doit intégrer les effets du poids propre (G), puisque celui-ci n'a plus le même effet de part et d'autre de l'inégalité à cause du coefficient 1,2.

Il faut alors regarder si : $$S\left[G + Q_{[1]+([P.E.B.]\times 1{,}1\times \delta)} \right] \leq \frac{1}{1{,}2}\ S\left[G + 1{,}2\ Q_{[rp100]\times \delta} \right]$$

<u>Remarque</u> : le dénominateur 1,2 est dû à la majoration des contraintes de 20% autorisée sous les charges militaires et le 1,2 en multiplicateur correspond à celui de la sollicitation du 1er genre du règlement de béton armé de 1964.

Dans le cas où l'on observe encore des dépassements, un recalcul complet de l'ouvrage s'impose.

<u>Remarque :</u> Comme indiqué ci-après au paragraphe b), la majoration de 20% des contraintes n'est pas acceptable pour les aciers passifs, par contre elle peut être acceptable pour le béton.

Exemple 2 :
Cas d'un ouvrage en béton armé construit en 1964 et élargi par diminution de la B.A.U.

Pour cette année de construction, le tableau du paragraphe 4.2 relatif aux ouvrages en béton armé

signale une dérogation. En effet, la décision ministérielle des 8 et 10 Décembre 1962 sur le programme des surcharges réglementaires des ponts portant autoroutes imposait de placer le char de 100 tonnes sur la B.A.U. vis à vis de la flexion transversale, mais l'interdisait vis à vis de la flexion longitudinale (poutraison principale).

Cette pratique a ensuite été modifiée par le titre II du fascicule 61 du cahier des prescriptions communes (C.P.C.) de 1971.

Un ouvrage dont la chaussée a été élargie par diminution ou suppression de la B.A.U. d'urgence (B.A.U.) peut présenter des insuffisances puisque le P.E.B. est supposé circuler sur la voie de droite qui de ce fait est l'ancienne B.A.U.

Dans ce cas un recalcul complet s'impose.

b) dérogations acceptables.

Certaines dérogations peuvent au contraire être jugées acceptables.

Exemple 1 : Augmentation de la contrainte admissible dans le béton sous charges militaires.

L'augmentation de 20% autorisée par plusieurs règlements pour la contrainte admissible de compression dans le béton peut être acceptable, dans la mesure où les contraintes de compression admissibles des anciens règlements étaient faibles pour le béton.

Par exemple, comparons l'IP 1 et le BPEL 91 pour un ouvrage où les essais de compression ont été réalisés sur éprouvette cylindriques.

> *Conformément au commentaire de l'article A.2.13 du BAEL 83, on peut considérer que* $s'_{28} = 1{,}1 \times fc_{28}$ *(avec* fc_{28} *résistance caractéristique à 28 jours).*
>
> *Pour un calcul en précontrainte moyenne, la compression maximale autorisée pour le béton par le BPEL 91, vaut* $s_{maxi\text{-}BPEL91} = (0{,}6 - k) \times fc_{28}$. .
> *En retenant k = 3%, on obtient* $s_{maxi\text{-}BPEL91} = 0{,}57 \times fc_{28}$. .
>
> *Finalement* $s_{maxi\text{-}BPEL91} = 0{,}57 \times fc_{28} = 0{,}57 \times s'_{28} / 1{,}1 = 0{,}52 \times s'_{28}$.
> *Cette valeur est à comparer à la valeur autorisée par l'IP 1* $s_{maxi\text{-}IP1} = 0{,}42 \times s'_{28}$.

Donc $s_{maxi\text{-}BPEL91} = 1{,}24 \times s_{maxi\text{-}IP1}$, la majoration de 20% est donc admissible. Au contraire, même si l'on considère que la résistance d'un béton âgé est supérieure de 10% à la résistance à 28 jours, une augmentation de 33% semble limite.

.

Il convient donc de vérifier pour chaque ouvrage les contraintes admissibles selon le BPEL 91 et selon le règlement de l'exécution pour apprécier la validité des dérogations relatives à la compression du béton.

La comparaison doit en particulier prendre en compte le nombre et la formes des éprouvettes écrasées (cf. [9]).

Exemple 2 : Autorisation de traction dans le béton précontraint avec mise en place d'aciers passifs longitudinaux pour maîtriser la fissuration.

La circulaire du 71-156 du 30 décembre 1971 modifiant l'IP 1 autorise des tractions dans le béton sous les charges militaires pour autant que des aciers passifs soient mis en place en quantité suffisante pour maîtriser la fissuration.

Cependant, cette règle était appliquée dès 1967 pour les VIPP sous charges militaires (cf. dossier type VIPP 67 du SETRA, pièce 2.5 page 6).

D'autre part certains ouvrages ont également été dimensionnés selon l'IP 1 avec des dérogations particulières autorisant des tractions sous les charges civiles. Ces dérogations anticipaient les dispositions de l'IP 2 et du BPEL (c'est le cas de certains ponts de l'autoroute A4).

Cette dérogation peut être jugée acceptable et les calcul simplifiés précédemment évoqués peuvent être effectués **sous réserve de vérifier en complément que les aciers passifs longitudinaux en place sont suffisants selon les règles du BPEL 91.**

3.2.6. L'effort tranchant.

Certains textes autorisent des dérogations spécifiques à l'effort tranchant qui n'apparaissent pas

sur les tableaux du chapitre 4.

Le lecteur trouvera en regard de chaque tableau du chapitre 4, les principales informations relatives à ces dérogations spécifiques à l'effort tranchant.

3.2.7. Le freinage.

Le P.E.B. peut circuler à 70 km/h sur autoroute. **Il est donc susceptible de créer des efforts de freinage.**

Un P.E.B. pondéré par 1,1 est plus léger qu'un char MC 120. Le char MC 120 n'est pas supposé rouler au pas puisqu'il est réglementairement affecté d'un coefficient de majoration dynamique.

Cependant, le titre II fascicule 61 ne prévoit aucun effort de freinage particulier à prendre en compte pour le char MC 120 (qui peut rouler en convoi comme le P.E.B.).

D'autre part la circulaire de 1983 [3], ne prévoit pas d'effort de freinage pour les convois de 3° catégorie qui sont censés circuler au pas. Pour la même raison la partie 3 de l'Eurocode 1 ne prévoit pas de force de freinage pour les véhicules spéciaux.

L'effort horizontal à retenir pour les calculs vaut **25 tonnes par P.E.B.** Cette valeur a été obtenue en extrapolant les formules de l'Eurocode pour le modèle de charge n°1. Les actions thermiques concomitantes sont celles des règlements de calcul en vigueur.

Si cela conduit à des efforts excessifs dans pour les appuis, il y a lieu d'adapter l'espacement des P.E.B.

3.2.8. Les points à vérifier.

La vérification d'un ouvrage doit être systématique. Elle doit concerner :

- la flexion longitudinale, mais aussi de la flexion transversale (vérification des éléments secondaires, entretoises, pièces de pont, etc.),

- l'effort tranchant,

- les réactions d'appui,

- le freinage,

- les effets des forces centrifuges le cas échéant.

Par contre il est inutile de vérifier la fatigue (cf. § 5.4) pour autant que l'ouvrage supporte le passage de moins de 1 P.E.B. par jour en moyenne.

3.2.9. Exemples de calculs.

Le lecteur pourra trouver aux paragraphes 5.2 et 5.3 du chapitre 5 - "Résultats des tests effectués" - des exemples de calculs menés pour des ouvrages types et pour des grands ouvrages selon les principes exposés ci-dessus.

4. COMBINAISONS D'ACTIONS A PRENDRE EN COMPTE.

4.1. Historique - Tableau chronologique tous règlements confondus.

Le tableau ci-après analyse depuis 1906 les différents textes réglementaires relatifs :
- aux calculs (ouvrages en béton armé, béton précontraint, ouvrages métalliques ou mixtes acier/béton),
- aux charges (civiles et militaires).

Pour chaque texte réglementaire, le tableau indique :
- sa date de parution,
- sa référence exacte,
- sa durée de validité,
- son domaine d'emploi (béton armé, métal, règlement de charge, etc.)
- une courte synthèse de son contenu (pour plus de précision se reporter au texte).

Remarque 1 :

Le tableau n'indique pas les textes non réglementaires qui pourtant peuvent avoir proposé des hypothèses et règles de calculs, par exemple :
- dossier type VIPP 67,
- recommandations pour maîtriser la fissuration des dalles de ponts mixtes,
- guide de conception et de justification des ouvrages vis à vis de la fatigue.

Remarque 2 :

Les règlements de charge antérieurs à 1958 sont moins agressifs que les règlements plus récents. Les ouvrages conçus et réalisés avec ces règlements risquent de poser des problèmes de charge portante vis à vis du convoi de P.E.B. avec trafic concomitant.

Remarque 3 :

Le tableau remonte à la circulaire de 1906 car certains ponts autoroutiers ont été calculés avec le règlement de 1934, et que pour comprendre le règlement de 1934, il faut remonter à 1906 !

TABLEAUX EXCEL : HISTORIQUE DES REGLEMENTS

.

4.2. Règlements relatifs aux ouvrages en béton armé.

Pour les ouvrages en béton armé, le tableau ci-après rappelle pour chaque date de construction :
- les textes applicables (calculs et charges),
- les combinaisons d'actions retenues par les différents règlements.

Pour chaque texte réglementaire, le tableau indique :
- sa date de parution,
- sa référence exacte,
- sa durée de validité,
- une courte synthèse de son contenu.

Le tableau permet donc pour une année donnée, de connaître les règlements de calcul et de charges en vigueur.

Le tableau indique de plus :
- les combinaisons prises en compte pour les charges civiles et militaires,
- les dérogations relatives aux charges militaires.

4.2.1. Principales insuffisances de calcul connues.

Pas d'insuffisance particulière à signaler. Vérifier cependant les dispositions constructives des ouvrages du début du siècle.

4.2.2. Les dérogations.

Des dépassements de 20 à 33 % des contraintes limites ont été autorisés par différents textes pour les charges militaires. Ces charges militaires étaient supposées circuler seules sur les ouvrages.

Ces dérogations ne sont plus acceptables vis à vis des contraintes dans les aciers.

Un dépassement de 20 % des contraintes limites du béton peut-être acceptable (cf. § 3.2.4.b exemple 1). Par contre un dépassement de 33% n'est plus acceptable.

Les dérogations d'effort tranchant.

Il n'y a pas de dérogation particulière à l'effort tranchant. Les dépassements de contraintes limites s'appliquent également directement pour les calculs relatifs à l'effort tranchant.

TABLEAUX EXCEL : BETON ARME

4.3. Règlements relatifs aux ouvrages en béton précontraint.

Pour les ouvrages en béton précontraint, le tableau ci-après rappelle pour chaque date de construction :
- les textes applicables (calculs et charges),
- les combinaisons d'actions retenues par les différents règlements.

Pour chaque texte réglementaire, le tableau indique :
- sa date de parution,
- sa référence exacte,
- sa durée de validité,
- une courte synthèse de son contenu.

Le tableau permet donc pour une année donnée, de connaître les règlements de calcul et de charges en vigueur.

Le tableau indique de plus :
- les combinaisons prises en compte pour les charges civiles et militaires,
- les dérogations relatives aux charges militaires.

Remarque : pour effectuer un calcul complet de l'ouvrage, il est nécessaire de plus de connaître d'autres circulaires relatives par exemple à la tension initiale des câbles, aux coefficients de frottement, etc.

4.3.1. Principales insuffisances de calcul connues.

Les ouvrages hyperstatiques en béton précontraint antérieurs à 1975 ont été souvent conçus sans tenir compte des gradients thermiques.

Les ouvrages hyperstatiques en béton précontraint antérieurs à 1975 construits par phases ont été souvent conçus sans tenir compte des redistributions d'efforts par déformations différées gênées.

Les coefficients de frottement et les pertes par relaxation ont longtemps été sous-estimés.

Les justifications vis à vis de **l'effort tranchant** ont subi des évolutions importantes et il peut en résulter des insuffisances vis-à-vis des règlements actuels.

En ce qui concerne la contrainte de cisaillement du béton :
- pour l'IP 1, c'est à dire pratiquement jusqu'en 1985, les contraintes limites relatives à "l'intégrité" du béton (critère de Chalos et Béteille) étaient données en commentaires et n'étaient pas réglementaires, d'autres critères pouvaient être utilisés (Caquot, Paduart).
- le BPEL 83 autorisait des contraintes nettement plus importantes que le BPEL 91.

En ce qui concerne les armatures d'âmes, l'application du règlement de 1953 pouvait conduire à des quantités trop faibles, voire à de simples étriers de construction.

4.3.2. Les dérogations.

Certains textes ont autorisé des dépassements de 20 % à 33 % des contraintes limites.

Un dépassement de 20 % des contraintes limites du béton peut-être acceptable (cf. § 3.2.4.b exemple 1). Par contre un dépassement de 33% n'est plus acceptable.

Enfin, certains règlements ont autorisé des tractions dans le béton sous réserve de la mise en place d'aciers passifs dans le béton pour maîtriser la fissuration. Cette dérogation est acceptable sous réserve que les aciers effectivement en place soient conformes aux dispositions du BPEL 91.

Il est à noter que les dérogations relatives à l'IP 1 sont restées valables jusqu'à fin 1985.

Les dérogations d'effort tranchant.

En ce qui concerne les aciers passifs, les dérogations de 20 % et 33 % autorisées par certains textes s'appliquaient également directement au calcul des aciers passifs dimensionnés par l'effort tranchant.
D'autre part, la circulaire 71-156 du 30 décembre 1971 (valable jusqu'à fin 85 pour les ouvrages calculés selon l'IP 1) autorisait des dérogations pour le calcul des armatures d'âme pour les charges militaires.
La contrainte admissible de ces armatures vaut $\rho'_a \sigma'_{en}$

Pour l'IP 1 $\rho'_\alpha = 1 - \frac{1}{3}\left(\frac{\tau_b}{\tau_{b\lim}}\right)^2$ s'il n'y a pas de reprise de bétonnage, et $\rho'_\alpha = \frac{2}{3}$ sinon.

Pour la circulaire de décembre 71 $\rho'_\alpha = 1 - \frac{1}{4}\left(\frac{\tau_b}{\tau_{b\lim}}\right)^2$ s'il n'y a pas de reprise, et $\rho'_\alpha = \frac{3}{4}$ sinon.

Un dépassement de 33 % n'est pas acceptable. Un dépassement de 20 % peut être acceptable (cela couvre a priori la dérogation de la circulaire de 1971), pour autant que les phénomènes de diffusion et

de poussées au vide aient bien été pris en compte.

TABLEAUX EXCEL : BETON PRECONTRAINT

4.4. Règlements relatifs aux ouvrages métalliques et aux ouvrages mixtes acier/béton.

Pour les ouvrages métalliques et les ouvrages à ossature mixte acier/béton, le tableau ci-après rappelle pour chaque date de construction :
- les textes applicables (calculs et charges),
- les combinaisons d'actions retenues par les différents règlements.

Pour chaque texte réglementaire, le tableau indique :
- sa date de parution,
- sa référence exacte,
- sa durée de validité,
- une courte synthèse de son contenu.

Le tableau permet donc pour une année donnée, de connaître les règlements de calcul et de charges en vigueur.

Le tableau indique de plus :
- les combinaisons prises en compte pour les charges civiles et militaires,
- les dérogations relatives aux charges militaires.

4.4.1. Principales insuffisances de calcul connues.

Les règlements présentaient des insuffisances vis à vis de la résistance à la fatigue et vis à vis de la fissuration des dalles des ponts mixtes avant la parution des documents [4] et [8], respectivement en 1996 et 1995.

Cependant, il n'est pas nécessaire d'effectuer de vérification particulière sur ces points dans le cadre de la vérification d'un ouvrage sous passage du convoi de P.E.B.

4.4.2. Les dérogations.

Des dépassements de 20 à 33 % ont été autorisés par différents règlements pour les charges militaires. Ces charges militaires étaient supposées circuler seules sur les ouvrages.

Ces dérogations ne sont plus acceptables.

Les dérogations d'effort tranchant.

Il n'y a pas de dérogation particulière à l'effort tranchant. Les dépassements de contraintes limites s'appliquent également directement pour les calculs relatifs à l'effort tranchant.

TABLEAUX EXCEL : METAL MIXTE

5. RESULTATS DES TESTS EFFECTUES.

5.1. Synthèse des résultats des tests.

5.1.1. Les grands ouvrages.

Pour les trois grands ouvrages testés le passage du convoi de P.E.B. ne pose pas de problème.

5.1.2. Les ouvrages types.

Au vu des résultats des tests effectués, on peut considérer que pour les ouvrages types dimensionnés au BAEL et au BPEL, le passage du P.E.B. ne devrait pas poser de problème en flexion longitudinale.

En flexion transversale en revanche il convient d'être prudent. Les tests effectués, parfois déterminants, ont mis en évidence en **particulier la nécessité de ne pas autoriser la circulation du P.E.B. sur la B.A.U**. **Il convient également de traiter avec soin la vérification des éléments secondaires, tels que les entretoises ou pièces de pont, qui peut s'avérer critique**.

Par exemple, dans un pont à poutres multiples entretoisées, la méthode de Courbon peut révéler des insuffisances de résistance des entretoises et un modèle en grill de poutres une insuffisances des poutres principales sous les mêmes charges de calcul.

5.1.3. La fatigue.

La vérification à la fatigue des ouvrages ne s'impose pas sous réserve que le nombre de P.E.B. soit en moyenne inférieur à 1 par jour. Au delà, une vérification doit être effectuée.

5.2. Tests effectués sur des grands ouvrages.

5.2.1. Généralités.

Nous avons testé les règles de calculs proposées dans le présent guide sur 3 structures :

a) un pont en béton précontraint construit par encorbellements successifs à tablier d'épaisseur variable (portée maximale 78 mètres),

b) un pont bipoutre en ossature mixte acier / béton à tablier d'épaisseur constante (portée maximale 70 mètres),

c) un pont haubané à deux nappes latérales à tablier en béton précontraint (portée maximale 152 mètres)

Nous avons considéré que les trois ouvrages avaient été dimensionnés selon les règlements en vigueur en 1997.

5.2.2. Profil en travers retenu.

Le profil en travers retenu est le même pour les trois ouvrages. Il est constitué de :

- une B.A.U. de 2 mètres,
- de deux voies de 3,50 mètres,
- une B.D.G. de 75 centimètres.

Ce profil en travers est conforme au profil autoroutier réduit à 2 fois 2 voies pour un trafic normal de la circulaire du 29 août 1991.

La chaussée est bordée par deux barrières de sécurité.

Les largeurs caractéristiques de ce profil en travers sont donc :

- largeur roulable au sens du fascicule 61 titre II : 9,75 mètres,
- largeur chargeable au sens du fascicule 61 titre II : 8,75 mètres, ce qui correspond à deux voies de chargement.
- largeur chargeable au sens de l'Eurocode : 9,75 mètres, y compris les aires résiduelles, B.A.U. et B.D.G.

Ce profil en travers a été retenu comme étant a priori le plus défavorable car il correspond à seulement deux voies de circulation selon le titre II fascicule 61, et à 9,75 mètres chargeables selon la partie 3 de l'Eurocode 1.

5.2.3. Hypothèses de calcul.

Les ouvrages étant considérés comme dimensionnés selon les règlements actuels nous avons pu

nous borner à comparer les seules sollicitations résultant des charges d'exploitation et éventuellement du gradient thermique.

- P.E.B. : nous avons appliqué à la charge de 97 tonnes le coefficient 1,1 et le coefficient de majoration dynamique et les charges de trafic concomitantes.
- gradient thermique : nous avons retenu un gradient thermique de 6° lorsqu'il était défavorable.
- Char MC 120 : nous avons également étudié l'effet du char MC 120.

- combinaisons : Conformément aux tableaux du chapitre 4 du présent guide nous avons comparé les combinaisons suivantes à l'E.L.S. rare (pour les notations cf. § 2.1 et 2.2) :

$$Q_{([PEB] \times 1{,}1 \times d\ +[1])} + (1 \text{ ou } 0)\ Q_{[grad=6]} \leq Q_{([A(l)] \times 1{,}2)} + (1 \text{ ou } 0)\ Q_{[grad=6]}$$

$$Q_{([PEB] \times 1{,}1 \times d\ +[1])} + (1 \text{ ou } 0)\ Q_{[grad=6]} \leq Q_{([Bc] \times bc \times \delta \times 1{,}2)} + (1 \text{ ou } 0)\ Q_{[grad=6]}$$

$$Q_{([PEB] \times 1{,}1 \times d\ +[1])} + (1 \text{ ou } 0)\ Q_{[grad=6]} \leq Q_{[Mc120] \times \delta}$$

(pour l'ouvrage mixte le gradient positif n'a pas été pris en compte)

5.2.4. Calculs longitudinaux.

6 courbes fournies en annexe donnent les enveloppes des combinaisons précédentes pour le moment fléchissant et pour l'effort tranchant et cela pour chacune des trois structures.

Nous constatons que :
- dans tous les cas le char MC 120 est moins défavorable que A(l) ou Bc, auxquels s'ajoute éventuellement le gradient thermique.
- pour les structures (b) et (c) le P.E.B. avec la circulation concomitante n'est pas dimensionnant.
- pour la structure (a) le P.E.B. et la circulation concomitante est à peu près équivalent à A(l) pour un espacement de 25 mètres. Le léger dépassement observé sur l'effort tranchant disparaît avec un espacement de 50 mètres.
- pour la structure (b) le fait que A(l) ou Bc soit largement dimensionnant s'explique par l'excentrement de Bc sur une structure à deux poutres.

Conclusion, les règles de calcul proposées ne conduisent pas à des surdimensionnements significatifs des grands ouvrages classiques.

5.2.5. Calculs transversaux.

Nous étudions ci-après la flexion transversale pour les trois grands ouvrages étudiés précédemment vis à vis de la flexion longitudinale.

Cette étude la flexion transversale est complétée par l'étude des ponts types effectuée au paragraphe 5.3

a) étude de l'encorbellement pour les structures (a) et (c). (caisson béton et bipoutre mixte)

Pour ces deux structures la BAU occupe tout l'encorbellement qui n'est pas circulé par le P.E.B.

Il n'y a donc pas de problème de flexion transversale dû au P.E.B. au niveau de l'encorbellement.

b) étude de la structure (b).

Il s'agit d'une dalle nervurée en béton précontraint avec pièces de pont (espacement 3,45 mètres).

Calculons la charge à affecter à une pièce de pont en considérant que toutes les charges se trouvant sur 3,45 mètres y sont ramenées.

P.E.B. essieux arrière 10,317 tonnes espacés de 1,36 m
une entretoise reprend 1,1 x 10,317 x 3,45 / 1,36 = 29 tonnes
MC 120 110 tonnes sur 6,10 mètres
une entretoise reprend 110 x 3,45 / 6,10 = 62 tonnes

Compte tenu du rapport des charges concernant une entretoise nous considérons que le P.E.B. n'est pas dimensionnant par rapport au char MC 120.

5.2.6. Etude des réactions d'appui.

De la même façon, nous avons vérifié que les réactions dues au P.E.B. mélangé au trafic concomitant, sont moins importantes que les réactions dues aux charges civiles et/ou militaires en

vigueur à l'époque de la construction de l'ouvrage.

5.3. Tests effectués sur des ouvrages types.

5.3.1. Généralités.

Les règles de calculs du présent guide ont été testées sur plusieurs ouvrages courants choisis de la façon suivante :

- ils sont calculés avec un logiciel de calcul de ponts-types du SETRA ;
- ils ont une longueur proche du maximum de portée de leur domaine d'emploi ;
- ils ont des élancements, balancements, et autres caractéristiques classiques.

Nous avons considéré que ces ouvrages avaient été calculés selon les règlements en vigueur en 1997. Notons que ces ouvrages ne correspondent pas à des cas réels.

5.3.2. Profil en travers retenu.

Le profil en travers retenu est le même pour tous les ouvrages courants. Ce profil est en revanche différent de celui retenu pour les grands ouvrages, des largeurs réduites ne se justifiant en effet pas pour des ouvrages courants.

Ce profil comprend :

- une longrine pour barrière de retenue de type BN 4 de 0,50 mètre ;
- une B.A.U. de 2,50 mètres ;
- deux voies de 3,50 mètres chacune, de même sens de circulation ;
- une B.D.G. de 0,50 mètre ;
- une longrine pour barrière de retenue de type BN 4 de 0,50 mètre.

Les largeurs caractéristiques de ce profil en travers sont donc :

- largeur totale : 11 mètres ;
- largeur roulable au sens du fascicule 61 titre II : 10 mètres ;
- largeur chargeable au sens du fascicule 61 titre II : 9 mètres, ce qui correspond à trois voies de chargement de 3 mètres de large chacune.

Ces largeurs conduisent également à trois voies de chargement pour les cas de charge de base des Eurocodes.

5.3.3. Description des ouvrages testés.

a) pont cadre de type PICF.

- tracé en plan : ouvrage droit, sans biais ;
- caractéristiques globales :
  - ouverture de 10 mètres ;
  - hauteur libre moyenne de 5,80 mètres ;
  - dalle de transition de 5,50 mètres de long ;
- caractéristiques par éléments :
  - épaisseur de la traverse supérieure égale à 0,68 mètre (soit un élancement du 1/15ème) ;
  - épaisseur de la traverse inférieure égale à 0,73 mètre ;
  - épaisseur des piédroits égale à 0,63 mètre ;
- logiciel de calcul : logiciel PICF - EL du SETRA.

b) pont en portique ouvert de type PIPO.

- tracé en plan : ouvrage droit, sans biais ;
- caractéristiques globales :
  - ouverture de 20 mètres ;
  - hauteur libre de 5,80 mètres ;
  - dalle de transition de 5 mètres de long ;
- caractéristiques par éléments :
  - épaisseur de la traverse supérieure égale à 0,80 mètre (soit un élancement du 1/25ème) ;
  - épaisseur des piédroits égale à 0,65 mètre ;
  - épaisseur des semelles égale à 0,65 mètre
- logiciel de calcul : logiciel PIPO - EL du SETRA.

c) pont à tablier à dalle en béton armé de type PSIDA à 1 travée.

- tracé en plan : ouvrage droit, sans biais ;
- coupe longitudinale :
  - une travée de 13 mètres de longueur entre axes d'appui ;
  - abouts de 0,60 mètre de longueur chacun ;

- coupe transversale :
  - hauteur totale de 0,63 mètre (soit un élancement du 1/21ème) ;
  - section rectangulaire ;
- logiciel de calcul : logiciel PSIDA - EL du SETRA.

d) pont à tablier à dalle en béton précontraint de type PSIDP.

- tracé en plan : ouvrage droit, sans biais ;
- coupe longitudinale :
  - quatre travées de 17 mètres, 25 mètres, 25 mètres et 17 mètres de portée chacune ;
  - abouts de 0,60 mètre de longueur chacun ;
- coupe transversale :
  - hauteur totale de 0,90 mètre (soit un élancement du 1/28ème) ;
  - section de type dalle à larges encorbellements ;
- logiciel de calcul : logiciel PSIDP - EL du SETRA.

e) pont à tablier à poutres en béton armé de type PSIBA.

- tracé en plan : ouvrage droit, sans biais ;
- coupe longitudinale :
  - travées indépendantes de 6 ou 10 mètres de portée pour l'étude de la flexion longitudinale ;
  - travées indépendantes comportant des entretoises espacées de 5, 8 ou 10 mètres pour l'étude de la flexion transversale ;
- coupe transversale :
  - 3 ou 4 poutres espacées respectivement de 3,5 ou 3 mètres ;
- justifications manuelles selon les modèles ayant permis d'établir les circulaires de 1975 et de 1985 et certaines dérogations.

f) pont à poutres en béton précontraint de type VIPP, sans entretoises intermédiaires.

- tracé en plan : ouvrage droit, sans biais ;
- coupe longitudinale :
  - travées indépendantes de 40 mètres de portée chacune ;
  - entretoises : deux entretoises d'about : calculs effectués selon la méthode de Guyon-Massonnet ;
- coupe transversale :
  - quatre poutres de 2,20 mètres de hauteur chacune (soit un élancement du 1/18ème), espacées de 3 mètres ;
  - hourdis général de 0,20 mètre d'épaisseur, sans débord par rapport à la table de compression des poutres de rive ;
- logiciel de calcul : logiciel VIPP - EL du SETRA.

g) pont à poutres en béton précontraint de type VIPP, avec entretoises intermédiaires.

- tracé en plan : ouvrage droit, sans biais ;
- coupe longitudinale :
  - travées indépendantes de 40 mètres de portée chacune ;
  - entretoises : deux entretoises d'about et trois entretoises intermédiaires : calculs effectués selon la méthode de Courbon ;
  - espacement des entretoises égal à 10 mètres (quart de la portée) ;
  - épaisseur des entretoises égale à 0,30 mètre ;
- coupe transversale :
  - quatre poutres de 2,20 mètres de hauteur chacune (soit un élancement du 1/18ème), espacées de 3 mètres ;
  - hourdis général de 0,20 mètre d'épaisseur, sans débord par rapport à la table de compression des poutres de rive ;
- logiciel de calcul : logiciel VIPP - EL du SETRA.

5.3.4. Hypothèses de calcul.

(pour les notations cf. § 2.1 et 2.2)

Les ouvrages étant considérés comme dimensionnés selon les règlements actuels, nous avons pu nous borner à comparer les seules sollicitations résultant des charges d'exploitation (cf. chapitre 3).

Pour les ouvrages isostatiques le gradient thermique ne crée pas d'effort et n'est donc pas pris en compte. Pour les ouvrages hyperstatiques, conformément aux errements habituels, le gradient thermique n'a pas non plus été pris en compte. Les logiciels de calcul des ponts types ne considèrent de toutes façons pas l'effet du gradient thermique.

a) charges du fascicule 61 titre II.

- Charges civiles de type A(L) (pondérées par a_1, a_2) ;
- Charges civiles de type B (Bc, Bt, Br) (pondérées par bc, bt et δ, coefficient de majoration dynamique) ;
- Convoi militaire MC120.

b) charges de la partie 3 de l'Eurocode 1.

Le coefficient de majoration dynamique est déjà inclus dans l'intensité de la charge du tandem TS et n'a donc pas été appliqué automatiquement par les logiciels de calcul.

c) P.E.B. mêlé au trafic de la partie 3 de l'Eurocode 1.

Plusieurs cas de charges ont été considérés, qui n'ont pas nécessairement été appliqués à tous les types d'ouvrages.

Dans les résultats présentés, la masse du P.E.B. (97 tonnes) est toujours pondérée par 1,1 pour prendre en compte les incertitudes sur la charge nominale et sur la répartition de la charge par la remorque. Elle est également multipliée par un coefficient de majoration dynamique calculé selon les principes du fascicule 61 titre II.

➔ P.E.B. sur la voie 1 + charges de trafic concomitante l'Eurocode sur les autres voies.
La charge UDL doit théoriquement être appliquée sur la voie 1 à l'extérieur du P.E.B. Ceci n'est pas réalisable actuellement par les logiciels de ponts-types et n'a ici que peu d'influence, les portées étant faibles par rapport à la longueur d'encombrement du P.E.B. Cette approximation a été faite pour tous les cas de charge avec P.E.B.
Sur la voie 1, dans ce cas de charge, le P.E.B. est appliqué seul.

➔ P.E.B. et TS sur voie 1 + charges de trafic concomitante de l'Eurocode sur les autres voies.
Le P.E.B. et le tandem TS sont ici espacés de 26,36 mètres entre axes d'essieux.

➔ P.E.B. et TS très éloignés sur voie 1 + charges de trafic concomitante de l'Eurocode sur autres voies.
Le P.E.B. et le tandem TS sont ici espacés de 34,95 mètres entre axes d'essieux. Ce cas est destiné à charger une travée sur deux (cas de l'ouvrage de type PSIDP).

➔ 3 P.E.B. sur la voie 1 + charges de trafic concomitante de l'Eurocode sur les autres voies.

➔ P.E.B. sur BAU + charges de trafic concomitante de l'Eurocode sur les autres voies.
Ce cas de charge, où le P.E.B. circule sur la BAU, a été modélisé pour l'étude de la flexion transversale. **Les résultats obtenus portent à conclure que la circulation du P.E.B. sur la BAU doit être interdite.**

d) combinaisons.

Conformément aux tableaux du chapitre 4 du présent guide, nous avons comparé les sollicitations correspondant aux combinaisons suivantes :

E.L.S. rare

$$Q_{([PEB] \times 1{,}1 \times d + [1])} \leq Q_{([A(l)] \times 1{,}2)}$$

$$Q_{([PEB] \times 1{,}1 \times d + [1])} \leq Q_{([B] \times b \times \delta \times 1{,}2)}$$

$$Q_{([PEB] \times 1{,}1 \times d + [1])} \leq Q_{[Mc120] \times \delta}$$

E.L.U.

$$1{,}35\ Q_{([PEB] \times 1{,}1 \times d + [1])} \leq 1{,}5\ Q_{([A(l)] \times 1{,}07)}$$

$$1{,}35\ Q_{([PEB] \times 1{,}1 \times d + [1])} \leq 1{,}5\ Q_{([B] \times b \times \delta \times 1{,}07)}$$

$$1{,}35\ Q_{([PEB] \times 1{,}1 \times d + [1])} \leq 1{,}35\ Q_{[Mc120] \times \delta}$$

5.3.5. Spécificités liées à l'utilisation des logiciels de calcul de ponts-types.

Depuis une année, ces logiciels sont en cours d'adaptation aux calculs selon les Eurocodes, mais n'étaient pas opérationnels lors des tests. Les chargements ont donc été modélisés manuellement, à l'aide de charges de type A(l) généralisées pour UDL ou de charges de type B généralisées pour P.E.B. et TS.

Les principales difficultés rencontrées ont été les suivantes :

- un calcul ne permet de charger qu'une voie à la fois ;
- sur une voie donnée, il n'est pas possible de faire varier l'espacement de plusieurs convois, de façon à trouver la position de l'ensemble des convois la plus défavorable pour l'ouvrage ;
- de même, il n'est pas possible de placer une charge uniformément répartie à l'extérieur de la

longueur d'encombrement d'un convoi donné sur une voie donnée.

En attendant que la prise en compte des charges de l'Eurocode puisse être effectuée "automatiquement", il y a lieu de se rapprocher du chef de l'arrondissement des ouvrages courants du Centre de Techniques d'Ouvrages d'Art du SETRA, pour l'utilisation des programmes de ponts types.

5.3.6. Calculs longitudinaux.

Les courbes fournies en annexe donnent, pour chacun des ouvrages courants décrits ci-dessus, les moments fléchissants longitudinaux et les efforts tranchants (les réactions d'appui pour le VIPP) dus à chacune des combinaisons précédentes.

Nous constatons dans tous les cas que :
- le char MC 120 est moins défavorable que A(l) ou Bc ;
- le P.E.B., avec la circulation concomitante, n'est pas dimensionnant ;
- le P.E.B. , avec la circulation concomitante, est très proche de A(l) ou Bc au voisinage des appuis.

Les règles de calcul proposées semblent donc pertinentes ; pour les ouvrages courants, en flexion longitudinale, le P.E.B., avec la circulation concomitante, n'est pas prépondérant vis-à-vis des charges du fascicule 61 titre II.

5.3.7. Calculs transversaux.

Les courbes fournies en annexe donnent, pour chacun des ouvrages courants décrits ci-dessus (excepté le VIPP), les moments transversaux dus à chacune des combinaisons précédentes.

Nous constatons dans tous les cas que :
- A(l) est moins défavorable que Bc ou le char MC 120 ;
- le P.E.B., avec la circulation concomitante, peut être dimensionnant ;
- les résultats obtenus sur le PSIDP avec le P.E.B. placé sur la BAU nous ont conduits à **conclure qu'il était plus prudent d'interdire la circulation du P.E.B. sur la B.A.U.**.

Le logiciel VIPP-EL n'effectue pas d'étude transversale spécifique. Nous avons donc étudié séparément les effets du P.E.B. sur la flexion d'une entretoise intermédiaire. Pour cela, nous avons réalisé un calcul manuel selon la méthode de Courbon.

Selon le calcul manuel, le P.E.B. n'était pas dimensionnant pour les entretoises intermédiaires du VIPP testé espacées de 10 mètres. En revanche un calcul similaire mené sur une entretoise de PSIBA conduisait à de légers dépassements. Ce type de vérification doit donc être effectué avec soin (cf. l'exemple donné au § 5.1.2).

Les règles de calcul proposées semblent également pertinentes en flexion transversale. Pour les ouvrages courants, en flexion transversale, le P.E.B. avec la circulation concomitante de l'Eurocode 1, peut être prépondérant vis-à-vis des charges du fascicule 61 titre II. Il convient donc d'effectuer systématiquement ces vérifications en flexion transversale qui peuvent parfois s'avérer problématiques. Les logiciels de calcul de ponts types doivent être utilisés avec clairvoyance, ceux-ci n'étant pas à la base conçus pour effectuer ce type de calculs.

5.4. Les buses.

Selon le document "Buses métalliques - Recommandations et règles de l'art" L.C.P.C.-S.E.T.R.A. de Septembre 1981, page 67, la pression au sommet d'une buse due aux convois de type E du titre II fascicule 61 est moins sévère que celle due aux charges A et B.

Le convoi de type E du titre II fascicule 61 (200 tonnes sur une surface de 15 mètres par 3,3 mètres soit 13 tonnes/ml) étant nettement plus agressif que le P.E.B. (100 tonnes sur une surface de 18 mètres par 3,44 mètres, dont 61,9 tonnes sur une longueur de 8,16 mètres soit 7,6 tonnes/ml), nous en déduisons que l'effet du P.E.B. est couvert par celui des charges A et B.

Il est donc inutile de faire des vérifications particulières des buses sous le passage du P.E.B.

5.5. Les murs de soutènement.

Les pratiques de calculs observées étant très variables d'un ouvrage à l'autre (prise en compte ou

non de charges d'exploitation concentrées, etc.), il n'est pas possible de définir à priori des catégories d'ouvrages pouvant supporter le passage du P.E.B. Chaque ouvrage doit donc faire l'objet d'une analyse.

Un pont est en général facilement perceptible par un conducteur. Il est donc envisageable d'interdire à un P.E.B. de s'arrêter sur la bande d'arrêt d'urgence d'un pont. Cette interdiction ne peut être étendue aux chaussées sur murs de soutènement, ces derniers étant des ouvrages difficilement perceptibles depuis la chaussée.

Moyennant la prise en compte de cette particularité, le principe général de vérification adopté pour les ponts dans le présent document s'applique également aux murs de soutènement quel que soit leur type.

C'est à dire que le vérificateur peut utiliser deux approches :

- soit recalculer entièrement le mur en prenant en compte le P.E.B. (le programme CAMUS de calcul de mur est en cours de mise au point au S.E.T.R.A.),
- soit comparer l'effet du P.E.B. aux effets des charges prises en compte dans le calcul initial du mur. Dans ce dernier cas, il est à noter que :
  - si l'ouvrage a été calculé uniquement avec une charge de 1 tonne/m² un recalcul complet s'impose.
  - si l'ouvrage a été calculé pour le passage du char MC 120, il est apte à supporter le passage du P.E.B., pour autant qu'il soit en bon état. En effet, contrairement à ce qui se passe pour les ponts, l'effet de la circulation concomitante est négligeable dans le calcul des efforts par rapport aux autres actions.
  - l'effet du P.E.B. peut pour certains types de murs être couvert par les forces horizontales correspondant aux chocs sur dispositifs de retenus, qui ne sont pas considérés comme concomitant du P.E.B.

5.6. Tests sur la fatigue.

Considérons un ouvrage mixte de caractéristiques moyennes, avec par exemple des portées de l'ordre de 50 mètres (pour les notations cf. § 2.1 et 2.2).

5.6.1. Etude de la fatigue en flexion longitudinale pour un ouvrage mixte

a) ouvrage qui a été calculé à la fatigue et pour lequel la fatigue a été dimensionnante.
(entrent dans cette rubrique les bipoutres de petites portées construits récemment)

Le camion Bf du document [4] est calibré pour représenter la circulation réelle supportée par l'ouvrage. Nous considérons un trafic autoroutier normal (c = 1,20) et donc un poids de camion Bf valant 30 x 1,20 = 36 tonnes.

Le P.E.B. pèse 97 tonnes en charge que nous pondérons par un coefficient de 1,1 pour prendre en compte les incertitudes sur le poids et par un coefficient de majoration dynamique que nous prenons égal à 1,15 (les convois circulent à 70 km/h), soit au total : 97 x 1,1 x 1,15 = 123 tonnes.

Nous notons $\Delta\sigma_{P.E.B.}$ l'étendue de contrainte au passage d'un P.E.B.

$\Delta\sigma_{Bf30}$ l'étendue de contrainte au passage du camion de fatigue (pondérée par c=1,20, c'est à dire pour un poids de camion de 36 tonnes).

Considérons une section qui a été dimensionnée à la fatigue et pour laquelle ce calcul a été dimensionnant et soit $\Delta\sigma_C$ la catégorie de détail de l'assemblage considéré.

Si la section est optimisée : $\gamma_{Mf} \times \Delta\sigma_{Bf30} = 0{,}405 \times \Delta\sigma_C$

(avec $\gamma_{Mf} = 1{,}20$ coefficient partiel de sécurité pour la résistance à la fatigue d'un élément "non redondant" et un détail d'assemblage accessible).

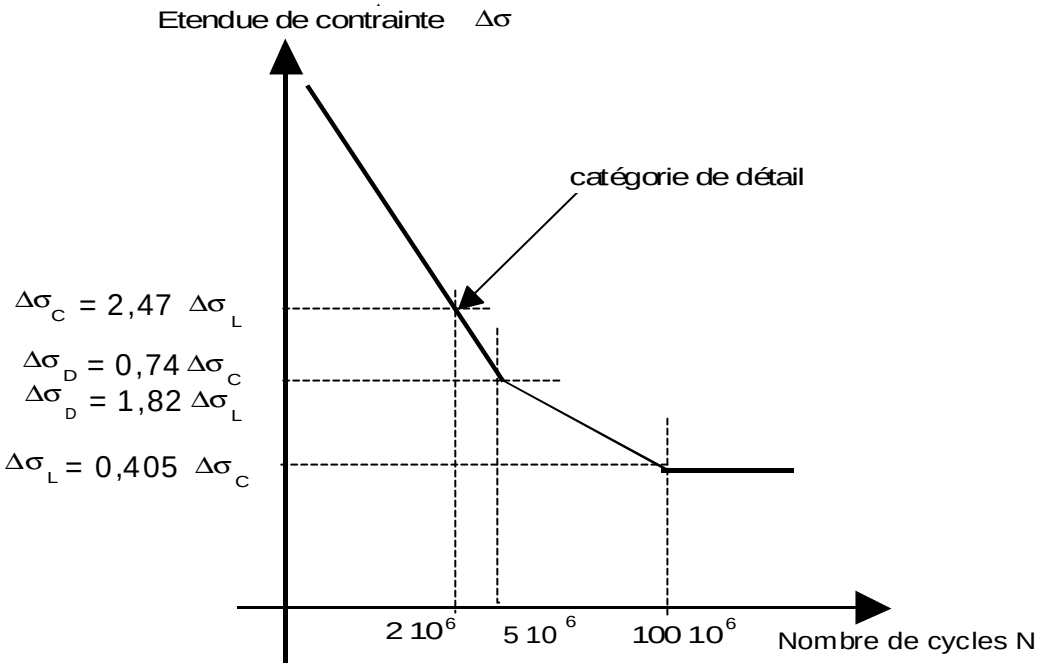
Nous avons établi par ailleurs que l'étendue de contrainte due au P.E.B. de 97 tonnes vaut environ 2,5 fois l'étendue de contrainte due au camion Bf de 36 tonnes.

En rajoutant le coefficient de majoration dynamique (1,15), et le coefficient de 1,1 couvrant des imprécisions sur le poids du P.E.B., nous obtenons la relation suivante :

$$\Delta s_{\text{P.E.B.}} = \left(\Delta s_{Bf30} \times 2{,}5\right) \times 1{,}15 \times 1{,}10 \approx \Delta s_{Bf30} \times 3{,}16$$

Connaissant cette valeur nous pouvons déduire la durée de vie correspondant à un ouvrage qui ne serait soumis qu'à des passages de P.E.B. (notons $N_{P.E.B.}$ le nombre de cycles correspondant à un endommagement unitaire. $N_{P.E.B.}$ est appelé durée de vie).

Pour cela nous utilisons la courbe ci-après :



Compte tenu du rapport $(\gamma_{Mf}\,\Delta\sigma_{P.E.B.}) / \Delta\sigma_L = 3{,}16$ nous sommes dans le premier segment de la courbe

$N_{P.E.B.} \times (\gamma_{Mf} \times \Delta\sigma_{P.E.B.})^3 = N_{P.E.B.} \times (\gamma_{Mf} \times \Delta\sigma_{Bf30} \times 3{,}16)^3 = N_{P.E.B.} \times (0{,}405 \times \Delta\sigma_C \times 3{,}16)^3$
$= 2\ 10^6 \times (\Delta\sigma_C)^3$

d'où $N_{P.E.B.} = 2\ 10^6 \left(\dfrac{1}{0{,}405 \times 3{,}16}\right)^3 = 0{,}95\ 10^6$

Selon Palmgren et Miner le cumul d'endommagement peut se faire simplement par cumul linéaire. Ainsi n_i cycles d'étendues de contrainte $\Delta\sigma_i$ créent un dommage partiel égal à n_i/N_i.

Et pour un élément de structure soumis à différents nombres de cycles d'étendues de contrainte variables, le dommage total est égal à la somme des dommages partiels correspondants à chaque étendue de contrainte : $D = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{N_i}$

Dans notre cas l'ouvrage est optimisé vis à vis de la fatigue, ce qui revient à dire qu'il est dimensionné pour 100 ans sous circulation réelle. L'endommagement pour une année hors P.E.B. est donc de 1/100.

Si nous considérons un passage de 1 P.E.B. par jour, l'endommagement pour une année dû au P.E.B. vaut : 365 / 0,95 10^6.

L'endommagement total pour une année vaut donc $\left(\dfrac{1}{100} + \dfrac{365}{0{,}95\ 10^6}\right) = \dfrac{1}{96}$

L'ouvrage peut donc tenir 96 ans avant apparition des désordres de fatigue, la durée de vie a donc été réduite de 4 ans soit 4%.

conclusion

Le passage du convoi de P.E.B. ne diminue que légèrement la durée de vie d'un ouvrage calculé à la

fatigue et pour lequel ce calcul a été dimensionnant.

b) ouvrage qui n'a pas été calculé à la fatigue et pour lequel la fatigue aurait été dimensionnante.
(entrent dans cette rubrique les bipoutres anciens de petites portées)

calcul de l'endommagement dû au P.E.B.

Nous considérons que ce type d'ouvrage peut résister à la fatigue pour un trafic réel qui serait représenté non plus par un camion de fatigue de 30 tonnes mais par un camion de fatigue de 24 tonnes.

Nous reprenons le calcul précédent en remplaçant 30 par 24 dans les diverses équations.

Nous notons $\Delta\sigma_{Bf24}$ l'étendue de contrainte au passage du camion de fatigue de 24 tonnes (pondéré par c=1,20, c'est à dire pour un poids de camion de 28,8 tonnes).

$$\Delta s_{P.E.B.} = \Delta s_{Bf30} \times 3{,}16 = \Delta s_{Bf24} \times 3{,}16 \times \frac{30}{24} = \Delta s_{Bf24} \times 3{,}95$$

$N_{P.E.B.} \times (\gamma_{Mf} \times \Delta\sigma_{P.E.B.})^3 = N_{P.E.B.} \times (\gamma_{Mf} \times \Delta\sigma_{Bf24} \times 3{,}95)^3 = N_{P.E.B.} \times (0{,}405 \times \Delta\sigma_C \times 3{,}95)^3$
$= 2\ 10^6 \times (\Delta\sigma_C)^3$

d'où $N_{P.E.B.} = 2\ 10^6 \left(\frac{1}{0{,}405 \times 3{,}95}\right)^3 = 0{,}49\ 10^6$

Si nous considérons un passage de 1 P.E.B. par jour, l'endommagement pour une année dû au P.E.B. vaut : 365 / 0,49 10^6.

calcul de l'endommagement dû à la circulation courante

Il convient de quantifier l'endommagement dû au trafic réel qui est en fait représenté par un camion de 30 tonnes et non pas par un camion de 24 tonnes.

Compte tenu du rapport $(\gamma_{Mf}\ \Delta\sigma_{Bf30}) / \Delta\sigma_L = 30/24 = 1{,}25$ nous sommes dans le second segment de la courbe

$N_{Bf30} \times (\gamma_{Mf} \times \Delta\sigma_{Bf30})^5 = N_{Bf30} \times (\gamma_{Mf} \times \Delta\sigma_{Bf24} \times (30/24))^5 = N_{Bf24} \times ((\gamma_{Mf} \times \Delta\sigma_{Bf24})^5$

mais $N_{Bf24} = 10^8$

donc $N_{Bf30} = 10^8 \times \left(\frac{24}{30}\right)^5 = 32{,}7\ 10^6$ cycles, ce qui correspond à 33 ans environ.

calcul de l'endommagement total

L'endommagement total pour une année est la somme des deux endommagements vaut donc $\left(\frac{1}{33} + \frac{365}{0{,}49\ 10^6}\right) = \frac{1}{32}$ L'ouvrage peut donc tenir 32 ans avant apparition des désordres de fatigue, la durée de vie n'a donc été réduite que de 1 an soit 3%.

conclusion

Le passage du convoi de P.E.B. ne diminue que très légèrement la durée de vie d'un ouvrage non calculé à la fatigue et pour lequel ce calcul aurait été dimensionnant.

En effet dans ce cas le principal endommagement provient du trafic réel.

c) ouvrage pour lequel la fatigue n'est pas dimensionnante.
(entrent dans cette rubrique les caissons et les bipoutre de grande portée)

Dans ce cas nous avons une réserve vis à vis de la fatigue. Le raccourcissement de la durée de vie dû au passage du P.E.B. devient soit encore plus faible soit nul.

5.6.2. Etude de la fatigue en flexion transversale pour un ouvrage mixte.

a) détermination des charges au mètre linéaire.
Camion Bf :
- poids : 1,2 x 30 = 36 tonnes

- 3 essieux arrière : 7,2 tonnes par essieux espacés de 1,30 m, soit **5,53 tonnes par ml.**

P.E.B. :
- poids : 1,1 x 97 = 107 tonnes
- essieux arrières : 1,1 x 10,317 tonnes par essieux espacés de 1,36 m, **soit 8,34 tonnes par ml.**

b) conclusion sur la flexion transversale.

Les calculs de fatigue précédents ont été faits en considérant que le P.E.B. induit des contraintes 2,5 fois plus importantes que le camion de fatigue.

Compte tenu :
- que le P.E.B. et le camion Bf circulent sur la même voie (voie lente) et donc occupent la même position transversale,
- que le rapport des poids au mètre linéaire est égal à 1,5 environ (8,34/5,53) soit largement inférieur à 2,5,

nous en déduisons que **pour la fatigue le P.E.B. est moins agressif vis à vis de la flexion transversale que vis à vis de la flexion longitudinale**.

5.6.3. Conclusion générale de l'étude de la fatigue.

Si l'ouvrage supporte en moyenne moins de 1 P.E.B. par jour, l'abaissement de la durée de vie de l'ouvrage occasionné par ce passage peut donc être considéré comme négligeable.

6. REFERENCES.

[1] Fascicule spécial n°75-92 bis circulaire n°75-173 du 19 Novembre 1975, des Ministères de l'Intérieur, de l'Equipement et de l'Industrie et de la Recherche, relative aux conditions d'instruction et de délivrance des autorisations de transport exceptionnel et de circulation des ensembles de véhicules comportant plusieurs remorques.

[2] Circulaire n°85-63 du 30 Août 1985 modifiant et complétant des dispositions relatives aux charges de la circulaire n°75-173 du 19 Novembre 1975, (voir aussi le décret n°88-848 du 28 Juillet 1988 modifiant le Code de la Route sur les charges à l'essieu).

[3] Lettre circulaire R/EG.3 de la Direction des Routes - Service de l'entretien, de la réglementation et du contentieux du 20 Juillet 1983 - Définition des convois types et règles pour la vérification des ouvrages d'art.

[4] Ponts métalliques et mixtes - résistance à la fatigue - guide de conception et de justification (S.E.T.R.A. - C.T.I.C.M. - S.N.C.F. Mai 1996 - F.9611).

[5] Circulaire n°89-52 du 22 Août 1989 relative à la circulation des transports exceptionnels sur autoroutes.

[6] Circulaire n°91-84 du 20 Décembre 1991 relative à la circulation des grues automotrices dont les dimensions et/ou le poids excèdent les limites autorisées par le Code de la Route.

[7] Eurocode 1, partie 3 : actions dues au trafic sur les ponts (ENV 1991-3).

[8] Ponts mixtes - Recommandations pour maîtriser la fissuration des dalles
(S.E.T.R.A. - Septembre 1995)

[9] Maintenance et réparation des ponts (J-A. Calgaro et R. Lacroix - 1997 - Presses de l'E.N.P.C.)

&&&&&&&&&&&&

.

Annexe

Résultats des tests effectués